



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**DIGITÁLNÍ ZPROVOZNĚNÍ ROBOTIZOVANÉHO
VÝROBNÍHO SYSTÉMU PRO 3D TISK**

DIGITAL COMMISSIONING OF A ROBOTIC PRODUCTION SYSTEM FOR 3D PRINT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Beránek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vetiška, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Ondřej Beránek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce: **Ing. Jan Vetiška, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Digitální zprovoznění robotizovaného výrobního systému pro 3D tisk

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Současná doba klade stále větší důraz na rychlé zprovoznění nových výrobních systémů a jejich flexibilitu. Jednou z cest jak tohoto cíle dosáhnout je využití tzv. virtuálního zprovoznění nově navrhovaného výrobního systému. Cílem práce bude virtuální zprovoznění robotizovaného pracoviště pro 3D tisk. Práce je založena na syntéze znalostí z mechaniky, elektřiny, automatizace, robotiky a programování.

Cíle diplomové práce:

Rešerše dané problematiky.
Systémový rozbor.
Sestavení virtuálního pracoviště pro 3Dtisk robotem.
Vytvoření sw pro pracoviště a jeho otestování.

Seznam doporučené literatury:

SICILIANO, Bruno a Oussama. KHATIB. Springer handbook of robotics. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-23957-4.

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie: 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTUM, 2016. ISBN 978-802-1448-285.

NOF, Shimon Y. Springer handbook of automation. 1. New York: Springer, 2009. ISBN 978-354-07-8-300.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem a digitálním zprovozněním robotizovaného výrobního systému pro 3D tisk z betonu. Teoretická část práce je věnována analýze současného stavu poznání oblasti 3D tisku v průmyslové automatizaci. Její součástí je také podrobný systémový rozbor řešené problematiky, ve kterém jsou specifikovány požadavky a prvky výrobního systému. V rámci praktické části práce byl vytvořen 3D model pracoviště a s využitím softwaru ABB RobotStudio byla provedena simulace celého výrobního procesu a digitální zprovoznění systému. Výstupem práce je návrh pracoviště s odladěným řídicím programem připraveným k využití v reálném provozu.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, beton, digitální zprovoznění, průmyslová automatizace, ABB RobotStudio, 3D Printing PowerPac, simulace, Contour Crafting

ABSTRACT

The master thesis describes the design and digital commissioning of a robotic production system for 3D concrete printing. The theoretical part of the thesis includes an analysis of the current state of knowledge in the field of 3D printing in industrial automation. It also includes a detailed system analysis of the problem, in which the requirements and elements of the production system are specified. In the applied part of the thesis, a 3D model of the workplace was created and a simulation of the entire production process and digital commissioning of the system were performed using the ABB RobotStudio software. The output of the application part of the thesis is the design of the workplace with a debugged control program ready for use in real operation.

KEYWORDS

3D printing, concrete, digital commissioning, industrial automation, ABB RobotStudio, 3D Printing PowerPac, simulation, Contour Crafting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BERÁNEK, Ondřej. *Digitální zprovoznění robotizovaného výrobního systému pro 3D tisk*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132035>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Jan Vetiška, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Srdečně děkuji vedoucímu této diplomové práce panu Ing. Janu Vetiškovi, Ph.D. za příležitost vypracovat závěrečnou práci pod jeho vedením. Jeho vždy proaktivní a přátelský přístup, odborné rady a ochota pomoci v každé situaci usnadnily a zpříjemnily proces tvorby této práce.

Poděkování patří zvláště mé rodině, přítelkyni a přátelům za podporu po celou dobu studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vetišky, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 21. 05. 2021

.....

Bc. Ondřej Beránek

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	17
2.1	Princip 3D tisku	17
2.2	Historický vývoj 3D tisku.....	18
2.3	Obecný tiskový proces.....	19
2.4	Technologie 3D tisku.....	20
2.4.1	Vytlačování materiálu – tisk z pevného materiálu	20
2.4.2	Fotopolymerizace – tisk z tekutého materiálu	21
2.4.3	Práškové spékání – tisk z práškového materiálu	22
2.5	3D tisk z betonu	23
2.5.1	Metody 3D tisku z betonu	24
2.5.2	Beton jako tiskový materiál	26
2.6	Automatizace	27
2.7	Průmysl 4.0	28
2.8	Digitální modelování	29
2.9	Digitální zprovoznění	29
2.9.1	Způsoby digitálního zprovoznění	31
2.9.2	Nástroje pro digitální zprovoznění	31
2.9.3	ABB RobotStudio.....	32
3	SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	33
3.1	Formulace cílů a řešení práce	33
3.2	Systém podstatných veličin	33
3.3	Součásti pracoviště	35
3.4	Tiskový materiál	36
3.5	Míchání a čerpání materiálu	37
3.6	Tisková hlava.....	39
3.7	Pohybový systém.....	41
4	SESTAVENÍ PRACOVIŠTĚ.....	43
4.1	Návrh pracoviště.....	43
4.2	Výběr prvků pracoviště	44
4.2.1	Robot	44
4.2.2	Tisková hlava.....	44
4.2.3	Směšovací čerpadlo	45
4.2.4	Senzorika	46
4.2.5	Bezpečnost.....	46
4.2.6	Čištění.....	47
4.3	Řízení pracoviště	47
5	DIGITÁLNÍ ZPROVOZNĚNÍ.....	49
5.1	Příprava pracoviště	49
5.1.1	3D Printing PowerPac	49
5.1.2	Příprava kontroléru	49
5.1.3	Import součástí	50
5.1.4	Tisková hlava.....	50
5.1.5	Tisková místa.....	51
5.1.6	Čištění.....	51

5.1.7	Směšovací čerpadlo.....	51
5.1.8	Tisková směs.....	53
5.1.9	Senzorika.....	53
5.1.10	Bezpečnost	54
5.2	Tiskový proces	54
5.2.1	Tvorba modelu	54
5.2.2	Slicer	55
5.2.3	Zpracování v 3D Printing PowerPac.....	57
5.2.4	Uživatelské rozhraní.....	58
5.3	Program pracoviště.....	60
6	PRACOVIŠTĚ S EXTERNÍ OSOU	63
7	ZHODNOCENÍ	67
8	ZÁVĚR.....	69
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	71
10	SEZNAM ZKRATEK, OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH	75
10.1	Seznam zkratek	75
10.2	Seznam obrázků	75
10.3	Seznam tabulek	77
10.4	Seznam příloh.....	77

1 ÚVOD

V dnešní době je kladen stále větší důraz na zvyšování efektivity výroby a přenechání namáhavé a rutinní práce lidí strojům při současném snižování nákladů. Naproti tomuto trendu jde rozvoj průmyslových robotů a automatizace. S automatizací jsou často spojovány výrobní závody, které jsou s jejím využitím schopny mnohakové sériové výroby, přičemž stále častěji tyto technologie nacházejí uplatnění i v kusové a netradiční výrobě např. v sochařství či architektuře. S jejich využitím mohou vznikat objekty, které by dříve dostupnými metodami nebylo možné vytvořit.

V posledních letech roste obliba využití tisku trojrozměrných objektů – 3D tisku a jeho spojením s jedním z nejpoužívanějších materiálů v architektuře, betonem, mohou vznikat objekty vynikající vzhledem i vlastnostmi. Běžně je pro dosažení požadovaného tvaru využíváno bednění, které slouží jako dočasná pomocná konstrukce, dokud materiál zcela nevytuhne. 3D tisk potřebu využití bednění zcela eliminuje, čímž se proces zjednodušuje a urychluje. S využitím zkušeností z ověřených konceptů 3D tiskáren na plasty je možné vytvořit výrobní systém odstraňující limity v dosavadních možnostech práce s betonem. Cílem této diplomové práce je návrh takového systému s využitím vhodných komponent a jeho digitální zprovoznění.

Digitální zprovoznění představuje moderní přístup uvádění výrobních systémů do provozu. Uspadňuje proces návrhu z hlediska konstrukčního uspořádání, díky využití modelování v počítači lze systém navrhnout bez investic a rizika poškození zařízení. S využitím simulace je možné připravit a odladit řídicí program před fyzickou realizací a značně tak urychlit uvedení do provozu.

Motivací pro volbu tématu závěrečné práce byla možnost rozšířit zkušenosti s postupy digitálního zprovoznění nabytými v průběhu studia. Při jejím vypracování bylo nutné spojit dovednosti z oblastí konstruování, procesního inženýrství a automatizace. Práce má za cíl popularizovat nový přístup ke tvorbě výrobních systémů a motivovat společnosti v průmyslu k modernizaci svých procesů.

Hlavním cílem této diplomové práce je návrh a digitální zprovoznění robotizovaného výrobního systému pro 3D tisk z betonu. Práce je členěna na několik částí, které reflektují proces návrhu systému vzhledem ke zadání práce. Přehled současného stavu poznání obsahuje řešerši zaměřenou na 3D tisk, automatizaci a digitální zprovoznění. Na jejím základě je proveden systémový rozbor řešené problematiky s popisem potřebných součástí pro realizaci pracoviště. Pracoviště je následně sestaveno v simulačním software ABB RobotStudio, ve kterém je vytvořena kompletní simulace tiskového procesu a odladěn řídicí program využitelný v praxi.

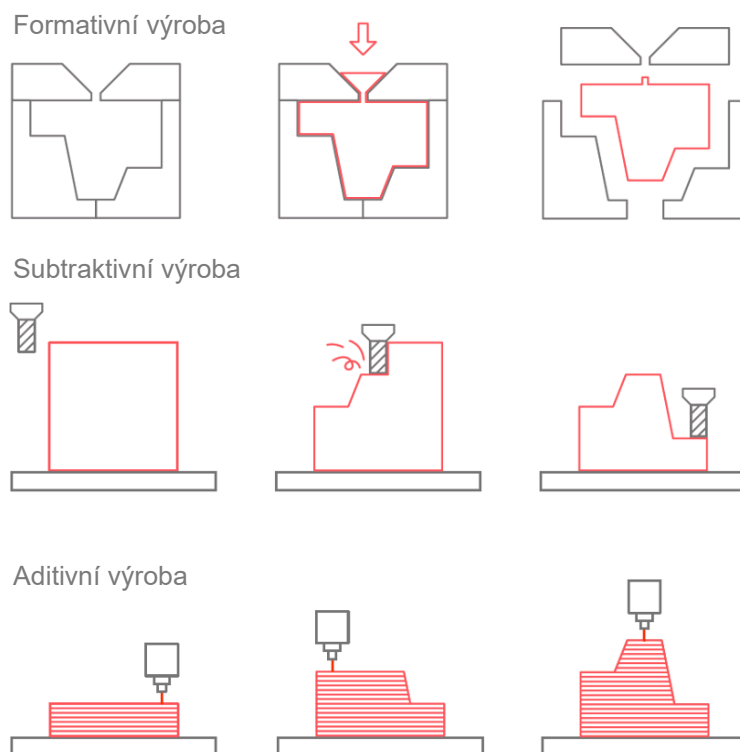
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Princip 3D tisku

Pojmem 3D tisk je nazýván výrobní proces, při kterém je přetvářen digitální model objektu do jeho reálné trojrozměrné podoby. Takový objekt vzniká tzv. aditivním (nanášecím) procesem, kdy je jeho model rozdělen do tenkých vrstev, ve kterých je následně nanášen materiál a je tak formován požadovaný objekt ve skutečnosti. Model objektu je nutné vytvořit v modelovacím software v počítači, případně je možné tento model získat procesem 3D skenování, kdy vznikne digitální kopie objektu a vlastní modelování tak není nutné.

3D tisk je proto často nazýván také pojmem aditivní výroba. Přímým opakem je tzv. subtraktivní proces, který probíhá např. při soustružení, kdy je naopak materiál odebírán a vzniká odpad. Aditivní a subtraktivní proces doplňuje tzv. formativní proces, kdy jsou k vytvoření požadovaného objektu potřeba předem připravené formy, např. při tváření.

Je zřejmé, že 3D tisk oproti konvenčním metodám vyniká schopností vytvářet komplexní tvary objektů bez nadbytečného materiálu a forem. Nejen pro to je 3D tisk jedním ze současných trendů a je využíván v mnoha odvětvích pro kusovou a netradiční výrobu, která je díky němu rychlejší při zachování vysoké kvality výrobku. [1]



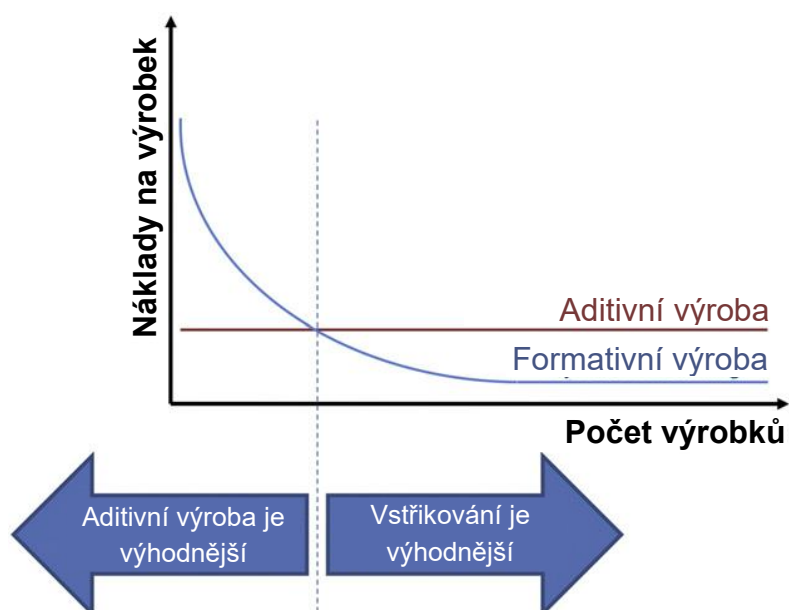
Obr. 1 Srovnání výrobních procesů [2]

2.2 Historický vývoj 3D tisku

První zmínka o 3D tisku se objevila již v 70. letech 20. století v časopise New Scientist [3], jeho realizace však proběhla až o dekádu později. V roce 1980 byla Hideo Kojamou podána patentová žádost na technologii *rapid prototyping*, která představila inovativní přístup tvorby objektů nanášením materiálu ve vrstvách. Kojama využil vytvrzování ve vrstvách nanášeného fotopolymery (materiálu měnícího svou strukturu působením světla) pomocí ultrafialového (UV) záření. Jeho cílem bylo přinést technologii pro zrychlení a zjednodušení tvorby prototypů v průmyslové výrobě. Tento záměr však nebyl naplněn, neboť pro problémy s financováním výzkumu nebyl jeho patent schválen. [4]

Za otce 3D tisku je tak považován Chuck Hull, který využil zkušenosti s vytvrzováním povrchu nábytku pomocí UV záření a v roce 1986 si nechal patentovat technologii stereolitografie (Stereolithography Apparatus, SLA), která principu představeného Kojamou využívá. Zanedlouho založil společnost 3D Systems, která již v roce 1988 vyvinula zařízení SLA-1, které lze považovat za prvního zástupce 3D tiskáren. O 4 roky později uvádí na trh první komerční 3D tiskárnu. [5] Od počátku 90. let 20. století začíná 3D tisk pronikat do různých odvětví a hledá se jeho efektivní využití v rámci průmyslových aplikací.

Za důležitý milník lze považovat rok 1992, kdy 3D tisk výrazně zjednodušil vývoj a testování součástek v leteckém a automobilovém průmyslu. Další průlom nastal v roce 1999 ve zdravotnictví, kdy se vědcům podařilo vytisknout část orgánu. [6] Fakt, že je 3D tisk skutečným fenoménem, potvrzuje více než 30.000 patentů souvisejících s 3D tiskem publikovaných jen v USA a více než 100 výrobců podnikajících v této oblasti. [7] To je důkaz, že trh aditivní výroby rapidně roste. V roce 2016 byla jeho hodnota odhadována na více než 6 miliard amerických dolarů. [8]



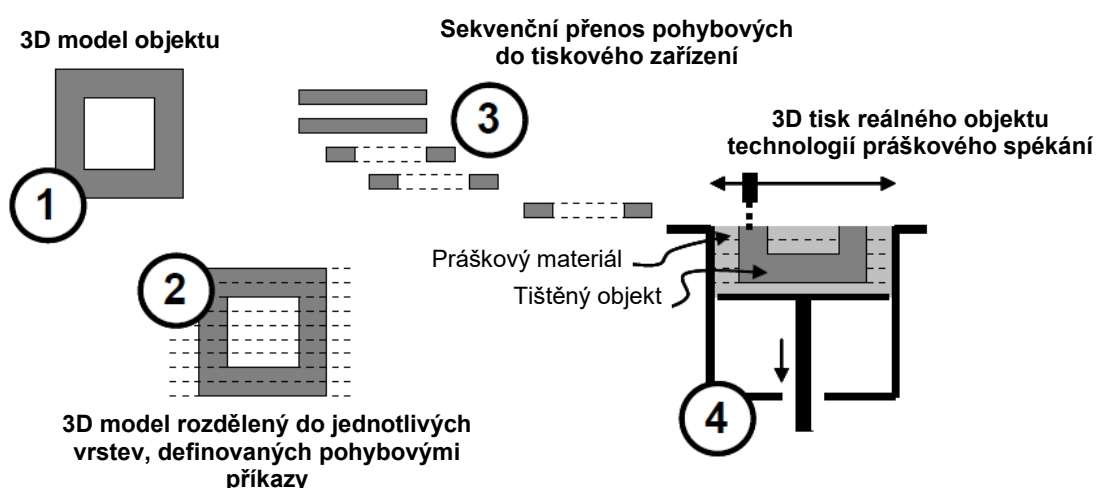
Obr. 2 Grafické srovnání finanční výhodnosti výrobních procesů vzhledem k produkci [9]

2.3 Obecný tiskový proces

Jak již bylo zmíněno, širokých možností 3D tisku je využíváno v mnoha odvětvích. Přestože se technologie 3D tisku mohou výrazně lišit, obecný výrobní proces, na jehož začátku je představa o finálním produktu a který končí vytvořením skutečného objektu, je pro ně společný.

Obecný výrobní proces prostřednictvím 3D tisku je možné rozdělit do 7 kroků:

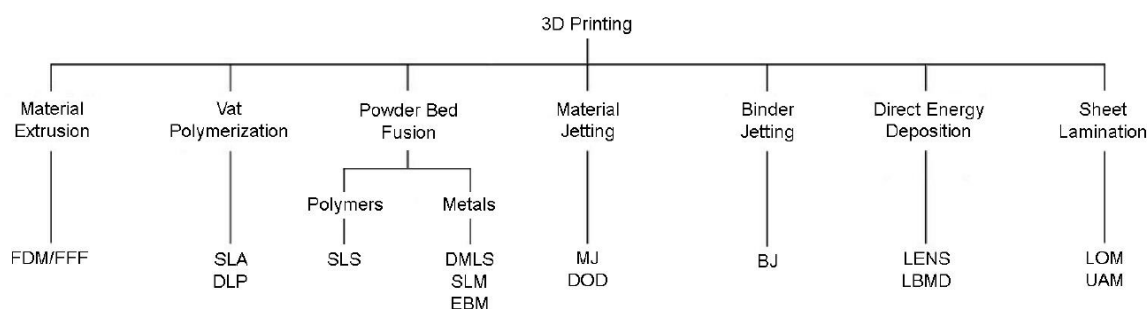
1. modelování – nejprve je nutné vytvořit model objektu, který bude digitální reprezentací skutečnosti. K tomuto účelu se využívá Computer Aided Design (CAD) software, který obsahuje nástroje pro snadné a intuitivní modelování;
2. export – hotový model se převede do souboru, který obsahuje všechny geometrické informace reprezentující model, nejčastěji je využíván Standart Tessellation Language formát (STL);
3. rozdělení do vrstev – data modelu jsou přeložena do pohybových příkazů, dle kterých bude nanášen materiál v jednotlivých vrstvách pomocí sliceru;
4. přenos – připravené příkazy jsou vhodným způsobem přesunuty do tiskového zařízení;
5. příprava tiskového zařízení – před samotným tiskem musí proběhnout nastavení tiskového zařízení vzhledem k povaze tisknutého objektu a využitého materiálu;
6. tisk – materiál je nanášen dle pohybových příkazů ve vrstvách a vzniká požadovaný objekt;
7. dokončení – finální produkt může být vzhledem k použité technologii nutné očistit, obrousit, či jinak upravit. Pokud jsou při tisku využity podpory, jsou v tomto kroku odstraněny. Produkt sestávající z více částí je v tomto kroku složen v jeden celek. [10]



Obr. 3 Schéma výrobního procesu 3D tisku [11]

2.4 Technologie 3D tisku

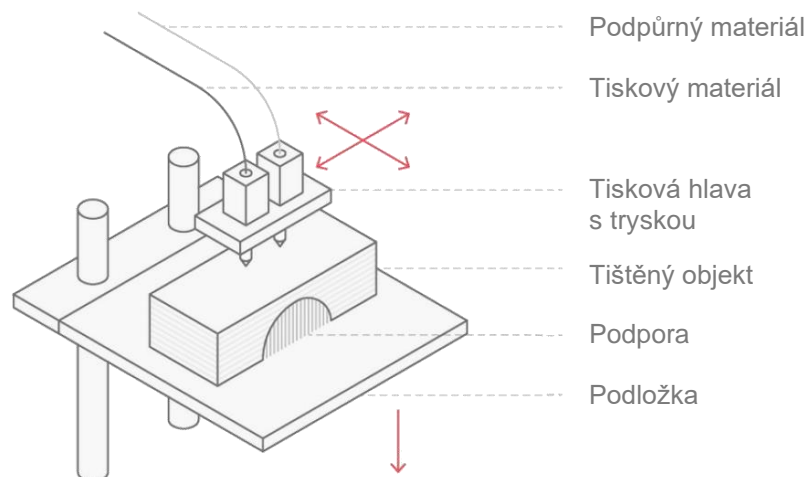
Technologie 3D tisku je možné klasifikovat mnoha způsoby, v této práci je využita klasifikace dle normy ISO/ASTM 52900 z roku 2015. Norma byla formulována výborem F42 American Society for Testing and Materials (ASTM), který čítá více než 150 odborníků zaměřujících se na tuto oblast. [12] V normě byly technologie roztrženy do 7 kategorií [13], z nichž byly vybrány tři nejrozšířenější kategorie – technologie na principu vytlačování materiálu (Material Extrusion), fotopolymerizace (Vat Polymerization) a práškového spékání (Powder Bed Fusion). Vybrané kategorie byly popsány pouze v obecné rovině za účelem pochopení základních principů, pro záměr této závěrečné práce není detailnější popis všech kategorií relevantní.



Obr. 4 Klasifikace technologií dle ISO/ASTM 52900 [2]

2.4.1 Vytlačování materiálu – tisk z pevného materiálu

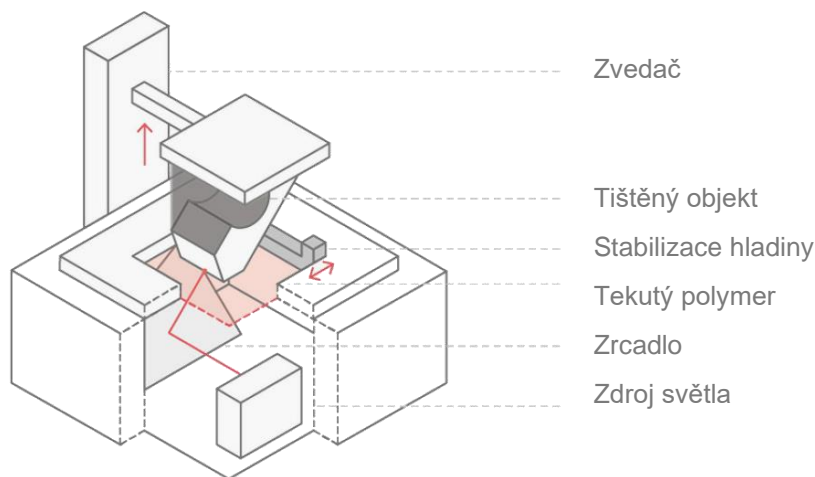
Tisk spočívá ve protlačování tuhého materiálu přes tiskovou hlavu s tryskou, kde je taven a takto natavený materiál je nanášen v jednotlivých vrstvách na podložku. Tryska se pohybuje ve dvou navzájem kolmých osách a vždy po nanesení vrstvy podložka klesne o tloušťku vrstvy a proces se opakuje do dokončení tisku. Při tisku je nutné eliminovat nežádoucí vlivy prostředí a zachovat jednotné podmínky tisku, např. konstantní teplotu okolí. Pro tuto technologii se využívá označení Fused Deposition Modeling (FDM), tuto ochrannou značku vlastní společnost Stratasys, proto existuje i označení Fused Filament Fabrication (FFF), využívané ostatními výrobci. Technologie je velmi oblíbená a hojně využívaná v široce rozšířených tiskárnách pro tisk plastu (termoplastická vlákna navinutá na cívkách), méně často se využívá pro tisk z vosku či kovu. V případě složitějších či tenkých struktur tiskový materiál doplňuje materiál podpůrný, který je po dokončení tiskového procesu odstraněn (dle použitého materiálu buď mechanicky, nebo chemicky). [2]



Obr. 5 Schéma FDM tiskárny [2]

2.4.2 Fotopolymerizace – tisk z tekutého materiálu

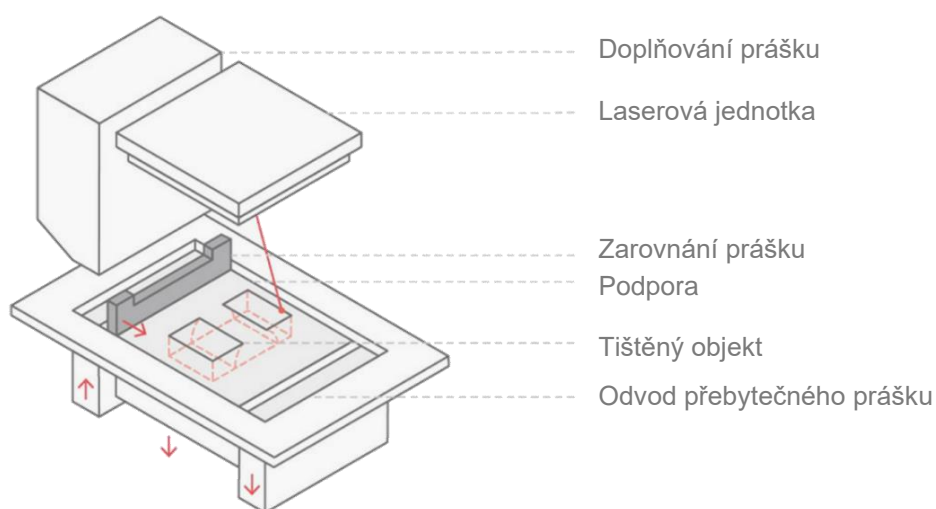
Při fotopolymerizaci dochází k vytvrzování tekutého fotopolymeru v zásobníku kontrolovaným paprskem ultrafialového světla či laseru. UV světla využívá technologie Stereolithography Apparatus (SLA), laser se objevuje v řešeních využívajících technologii Digital Light Processing (DLP). V osvětlených místech pak dochází ke změně struktury, fotopolymer mění své vlastnosti a tvrdne, čímž vzniká požadovaný objekt. Objekt, který vzniká ve vrstvách, je uchycen na pohyblivé platformě, díky které se postupně vynořuje ze zásobníku. Po vytištění jedné vrstvy je hladina fotopolymeru vždy stabilizována pro zachování kvality tisku. [6]



Obr. 6 Schéma SLA tiskárny [2]

2.4.3 Práškové spékání – tisk z práškového materiálu

Poslední zde představená technologie se principem velmi podobá fotopolymerizaci, rozdílný je však využitý materiál. Namísto tekutého fotopolymeru se využívá pevný prášek, který se nachází v zásobníku, jehož dno klesá a prášek je kontrolovaným laserovým paprskem po vrstvách spékán do podoby požadovaného objektu. Po dokončení jedné vrstvy dno zásobníku klesne o výšku jedné vrstvy, prášek je doplněn a zarovnán a tiskový proces pokračuje. Zbylý materiál v zásobníku slouží jako podpora tisknutého objektu. Princip práškového spékání využívá technologie Selective Laser Sintering (SLS), která pracuje s plasty, keramickým práškem, či pískem; také technologie Direct Metal Laser Sintering (DMLS) určená pro tisk kovových součástí. [6]



Obr. 7 Schéma SLS tiskárny [2]

2.5 3D tisk z betonu

Z dříve uvedených informací jsou benefity 3D tisku zřejmé a je logické, že je zde intenzivní snaha těžit z nich i v oblasti architektury či umění. 3D tisk má potenciál přinášet řešení současných problémů, jako je nedostatek kvalifikované pracovní síly, nízká produktivita práce, množství nehod na staveništích, ztenčování zdrojů, či vysoká složitost stavebních procesů. Navíc tyto nové přístupy umožňují tvořit složité a propracované struktury s vynikajícími vlastnostmi a mají především pozitivní vliv na ekologický dopad staveb, neboť nedochází ke vzniku nadbytečného materiálu. [14] Studie ukázaly, že se využitím 3D tisku dá celkově ušetřit 30–60 % stavebního odpadu, 50–80 % mzdových nákladů a více než 50 % stavebního času. [15]

Od konce 20. století jsou hledány cesty co nejuniverzálnějšího využití aditivní výroby v architektuře pro řešení výše uvedených problémů. Neboť je tento vývoj závislý především na rozvoji oblastí robotizace a automatizace, zpočátku byl 3D tisk využíván pouze pro tvorbu architektonických modelů či stavebních prototypů s cílem umožnit tvůrcům zhmotňování jejich myšlenek a snadnou prezentaci klientovi. [11]

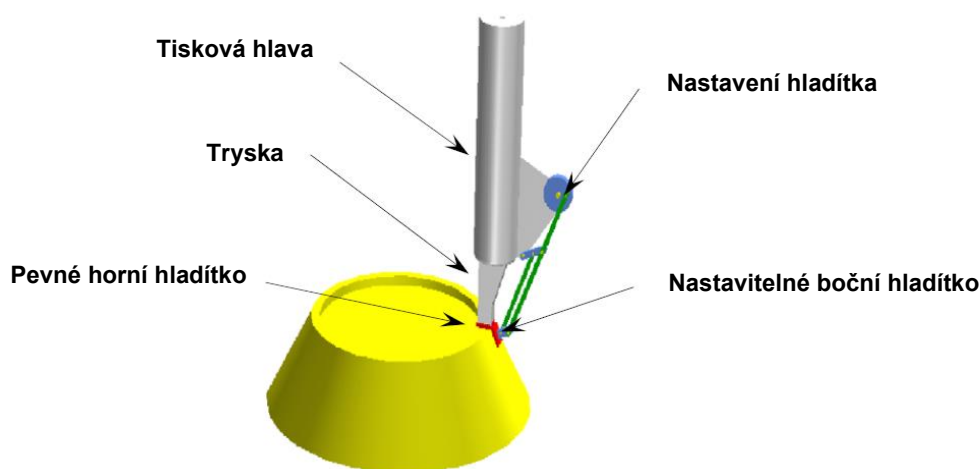
Opravdový rozmach 3D tisku v tomto odvětví nastal v posledních letech, kdy došlo k posunu od modelů k reálným stavbám. Na jedné straně je 3D tisk využíván ke kusové a zakázkové výrobě speciálních stavebních prvků, např. sloupů či jiných architektonických doplňků (tisk mimo staveniště, nutný transport objektu na místo užití, tzv. off-site), ale na straně druhé se objevuje stále více pokusů dostat 3D tisk přímo na staveniště (není nutný transport objektu na místo užití, tzv. on-site). [14]

Vznikají tak netradiční objekty, které oproti těm stavěným tradičními metodami, vynikají svými tvary, vlastnostmi, rychlostí a bezpečností výstavby a také dopadem na životní prostředí a své okolí. Lze je považovat spíše za prototypy a ukázkou schopností stále se vyvíjejících technologií, které mají ambici být jedním z řešení problémů, kterým naše společnost čelí. Globalizace a s ní spojený přesun velkého množství obyvatel, či přírodní katastrofy ničící obydlená území přináší potřebu rychlého, přitom spolehlivého a efektivního způsobu výstavby obydlí. Řešením může být právě 3D tisk. Realita je prozatím taková, že jsme schopni s řadou omezení a zatím neekonomicky tisknout části svislých nosných a kompletačních konstrukcí, zatímco tisk celých budov včetně systémů domovní techniky zatím zůstává v oblasti vizí. [16] Podaří-li se odstranit technologické nedostatky, vytvořit skutečně spolehlivá tisková řešení a také připravit legislativní podmínky pro uzákonění vytištěných staveb, můžeme se stát svědky skutečné revoluce a nadobro tím oblast stavebnictví změnit. [11]

2.5.1 Metody 3D tisku z betonu

V současnosti se pro účel 3D tisku v architektuře osvědčily tři metody: Contour Crafting, Concrete Printing a D-Shape.

Vůbec první využití betonu pro účely tisku se datuje roku 1998, kdy byl úspěšně realizován tisk metodou Contour Crafting, která pracuje na stejném principu jako technologie FDM a při tisku dochází k vrstvení jednotlivých vrstev betonové směsi na sebe. Pasta na bázi cementu je vytlačována na hladítko, které vytváří hladký povrch vrstvy a zabraňuje hromadění materiálu a nerovnoměrné nanášení. Tisk je však omezen velikostí a tvarem stěrky. Jedná se o tzv. mokrý proces, kdy je na vstupu tekutá směs, která po nanesení zasychá a tvrdne. Jako tiskový materiál lze využít také keramickou suspenzi či polymery. [9]



Obr. 8 Schéma tisku metodou Contour Crafting [17]

Této technologii věří a snaží se s ní komerčně uspět např. čínská společnost Winsun, která v roce 2014 vytiskla jednoduchý dům jako ukázkou schopností jejich technologie. Od té chvíle společnost posouvá schopnosti této technologie a rozšiřuje portfolio svých produktů, např. o nejvyšší budovu vytvořenou 3D tiskem na světě v roce 2015 [18] (Obr. 9a) a či unikátní kancelářskou budovu v Dubai, dokončenou v roce 2016. [19]



Obr. 9 a) Nejvyšší budova vytvořená 3D tiskem na světě [18], b) kancelářský objekt v Dubai [19]

Za zmínku jednoznačně stojí český počín v oblasti 3D tisku – dům Prvok, který je zároveň považován za umělecké dílo. Společnost schoolpt jej v roce 2020 vytiskla za pouhých 48 hodin (hrubá stavba) právě metodou Contour Crafting. Společnost se zaměřuje na zakázkový 3D tisk a tímto produktem chce na sebe upoutat pozornost veřejnosti a popularizovat možnosti 3D tisku. Dům vyniká svým tvarem, vnitřním uzpůsobením i umístěním v prostředí, je postaven na plovoucím pontonu na řece Vltavě a umístěn u Střeleckého ostrova. Tradiční stavby překonává i ve vlastnostech, výrobce uvádí, že vytištěná skořepina má 3x větší pevnost než beton a odolá i velkému nárazu. Pro tisk byla použita speciální betonová směs MasterFlow 3D 100 od společnosti BASF. Materiál po zlepšení svých vlastností obsahuje polypropylenová mikrovlákná a má omezené smrštění pro zamezení vzniku trhlin.[20, 21]



Obr. 10 a) Dům Prvok vytvořený 3D tiskem (vlevo), b) detail struktury zdi domu Prvok (vpravo) [20]

Alternativu k metodě Contour Crafting představuje italská technologie D-Shape, která je obdobou stereolitografie (SLS). Technologie patentovaná již v roce 2006 jednotlivé vrstvy tisknutého objektu tvoří z jemného plniva (jemnozrný písek), které je spojováno tekutým pojivem (nejčastěji cement, příp. polymerní pryskyřice) a působením tlaku v prostorově ohraničené tiskové komoře. D-Shape tisk využívá tzv. suchého procesu, kdy se pracuje s práškovým materiálem, který je postupně spojován. Proces tisku začíná nanesením vrstvičky písku, na kterou je následně ve druhém kroku nasprejováno soustavou trysek o průměru desetin milimetrů pojivo v místě polohy budoucí konstrukce. Tento proces se opakuje až do momentu nasprejování poslední vrstvy. Plnidlo, které nebylo spojeno, slouží jako podpora již vytištěným vrstvám, tato metoda je tedy výhodný v téměř neomezené volnosti tvarů. [16, 22] Technologie je vhodná pouze pro tisk menších objektů, proto je s oblibou využívána pro tisk dekorativních prvků. [23]

Poslední metoda Concrete Printing je také založena na vytlačování cementové malty, nicméně volí odlišný přístup v nanášení směsi (nejsou využívány stěrky) a umožňuje tak tisk geometricky složitějších objektů. Absence stěrky ale vyžaduje úpravu povrchu po dokončení tisku. Naopak výhodou této metody je výrazně menší rozlišení čisticího materiálu v porovnání s Contour Crafting, což umožňuje větší kontrolu nad geometrií tištěného objektu. [9]



Obr. 11 a) Příklad objektu vytištěného metodou D-Shape (vlevo), b) příklad objektu vytištěného metodou Concrete Printing (vpravo) [9]

2.5.2 Beton jako tiskový materiál

Beton patří mezi nejoblíbenější materiály. Jeho výhody jsou zřejmé – suroviny pro jeho výrobu jsou levné a dostupné téměř kdekoli na světě (nejsou potřeba speciální suroviny z určitých lokalit), vyniká pevností, odolností vůči ohni či vodě a v závislosti na jeho složení a struktuře může být vhodným způsobem téměř neomezeně tvarován.

Termín beton označuje širokou oblast kompozitů, které se v základu skládají z písku, šterku či jiného granulovaného materiálu, cementu a vody. Následnou exotermickou hydratační reakcí mezi cementem a vodou vznikne kašovitá, tekutá hmota, která po zaschnutí vytvoří pevnou betonovou strukturu. Tato hmota se při tradičním způsobu výstavby vlévá do předpřipraveného bednění, které se po vytvrzení odstraní. [24]

Využití betonu pro 3D tisk si však žádá směs speciálně upravenou pro tento účel. Pro zachování dobrého poměru mezi rychlým a kvalitním tiskem je nutné pracovat s rychleschnoucím tiskovým materiálem, který je možné snadno čerpat a který se po tisku nedeformuje a nedegraduje. Při dříve zmíněných technologiích FDM, či SLS je možné nedostatky v materiálu nahrazovat kontrolovaným externím zdrojem energie (nastavitelná teplota extrudéru, laser atp.), u betonu takový přístup není možný a je proto nutné obzvlášť dbát na složení tiskové směsi. Časté je využití přísad ovlivňující tuhnutí, viskozitu a celkové chování směsi.

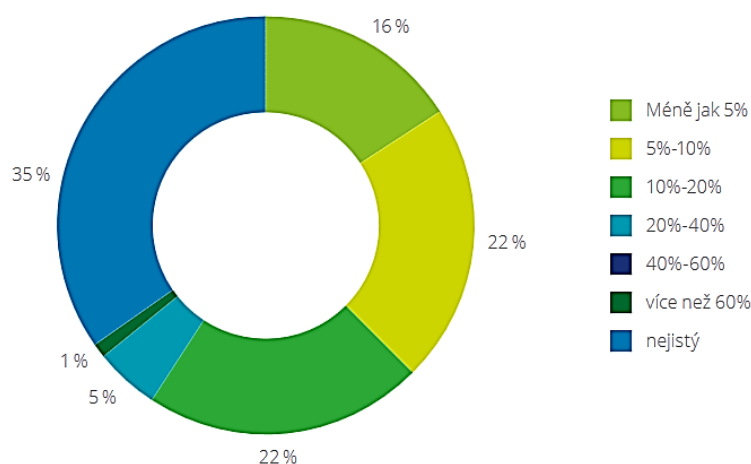


Obr. 12 Betonové sloupky vytvářené tradiční metodou pomocí bednění [25]

2.6 Automatizace

Automatizace výrobních procesů, kdy dochází k nahrazování lidských pracovníků univerzálními roboty, je fenoménem současné doby. Výrobní závody záměnou zaměstnanců za roboty zvyšují rychlost, spolehlivost a schopnost kontroly výrobních procesů. Roboty jsou totiž univerzální, nevyžadují odpočinek a mohou pracovat i v podmínkách, ve kterých by člověk nemohl.

Byť prvotní investice do robotické automatizace vyžadují pro výrobní závody vynaložení značných finančních prostředků, ukazuje se, že se tyto změny z dlouhodobého hlediska finančně vyplácí. Tématu se podrobně věnovala společnost Deloitte, která v rámci své studie z roku 2018 věnované automatizaci v ČR dotázala 110 finančních ředitelů českých výrobních společností a z výsledků vyplývá, že úspora nákladů se pohybuje průměrně na hranici 10 %. Uvedená hodnota se může zdát na první pohled nízká, avšak v kontextu velikosti výrobních společností se může jednat o úsporu v řádech jednotek až desítek milionů Kč. [26]



Obr. 13 Míra úspory nákladu pomocí robotické automatizace [26]

Studie zkoumá i vliv automatizace na pracovní trh. Existuje obava, že její nárůst v průmyslu značně ohrozí pracovní místa a může tak negativně ovlivnit ekonomický stav státu. Ze studií vyplynulo, že více než 50 % pracovních míst automatizace ovlivní. Mezi nejméně ohrožené spadají specialisté, zákonodárci a řídící pracovníci. Technické pracovníky není možné vzhledem k příslušnosti k různým průmyslovým oblastem zařadit do jedné společné skupiny, lze však prohlásit, že jsou v rámci rizika rozdělení rovnoměrně. Automatizace představuje vyšší riziko pro řemeslníky a opraváře, podobně jako pro pomocné a nekvalifikované pracovníky. To v případě rozšíření automatizace ve stavebnictví značně ohrožuje mnoho pracovních pozic, zejména zedníky, pokladače, montéři a další stavební pracovníky. Automatizované systémy vyžadují správu a údržbu, což se může pozitivně projevit ve vzniku nových pracovních míst a snížit riziko dopadu automatizace na ekonomiku a zaměstnanost. [26, 27]

2.7 Průmysl 4.0

Termín Průmysl 4.0 byl definován v Německu a označuje iniciativu zahájenou Německou spolkovou vládou v roce 2011 s cílem digitalizace výrobních procesů. [28] Číslovka označuje čtvrtou průmyslovou revoluci – první byla založena na průmyslovém využití síly vody a parního stroje, druhá revoluce souvisela s rozšířením elektrické energie a rozvoji infrastruktury pro její distribuci a zatím poslední třetí proběhla v druhé polovině 20. století s masovým rozšířením počítačů a s nimi spojené digitalizace, ostatních informačních technologií a automatizace.

Průmysl 4.0 uvádí koncept „chytré továrny“ vybavené kyberfyzikálními systémy (CPS) a inteligentními technologiemi schopnými propojit strojní, tovární a obchodní procesy. Má za cíl propojit technologické oblasti a zajistit jejich efektivní spolupráci, kdy jsou schopny vyměňovat mezi sebou informace, na jejichž základě činit autonomní rozhodnutí a vytvořit tak komplexní výrobní celek. Iniciativa si klade za cíl usnadnit lidskou práci a repetitivní činnosti přenechat strojům, usnadnit přípravu a realizaci výroby (digitální zprovoznění, simulace), přinést možnost větší kontroly nad celým výrobním procesem (vzdálená diagnostika, prediktivní údržba) a získané informace využít k optimalizaci všech procesů. [29–31]

Na Obr. 14 jsou zobrazeny klíčové technologie, které Průmysl 4.0 utvářejí a 3D tisk je jednou z nich.



Obr. 14 Klíčové prvky Průmyslu 4.0 [30]

2.8 Digitální modelování

Nedílnou součástí konceptu Průmyslu 4.0 je digitální modelování. Transformace reálných objektů do digitálního prostředí umožňuje dát přípravě výrobních systémů větší dynamiku a také ji usnadňuje, neboť až do okamžiku instalace systému není potřeba pracovat s reálnými součástmi.

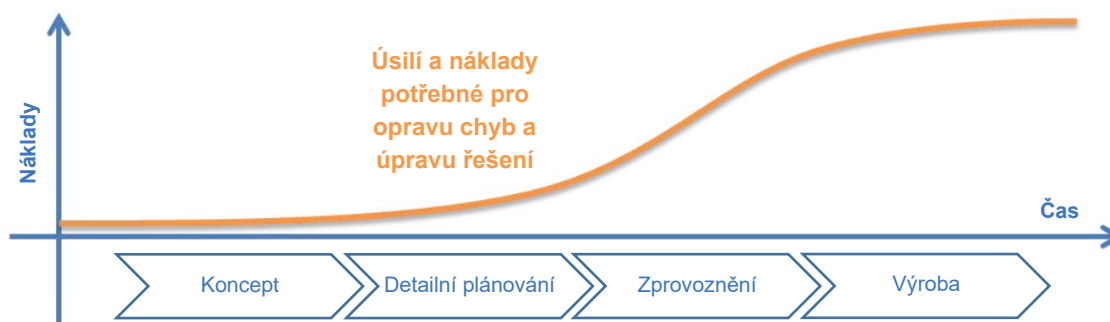
Digitální modelování je klasifikováno do tří podkategorií dle úrovně jejich integrace:

- Digitální model – Digitální reprezentace již existujícího či plánovaného fyzického objektu, schopná plně zrcadlit jeho vlastnosti a funkce. Jedná se o trojrozměrné grafické znázornění fyzického objektu, které však obsahuje i dynamické chování a informace o senzorech a akčních prvcích použitých ve fyzickém objektu. Mezi fyzickým a digitálním objektem nedochází k žádné automatizované výměně dat.
- Digitální stín – Rozšíření digitálního modelu o automatickou jednosměrnou komunikaci z existujícího fyzického objektu do odpovídajícího digitálního modelu objektu.
- Digitální dvojče – Kompletní digitální model, kde tok dat mezi digitálním a fyzickým objektem probíhá plně v obou směrech. Změna stavu jednoho z objektů vede ke změně stavu ostatních objektů. [32]

2.9 Digitální zprovoznění

K dosažení vyšší efektivity výroby a zhodnocení investice do automatizace je nutné výrobní proces zautomatizovat tak, aby byl spolehlivý a přinášel požadované výhody. Ekonomický úspěch produktu závisí do značné míry na době, za kterou je možné ho začít sériově vyrábět.

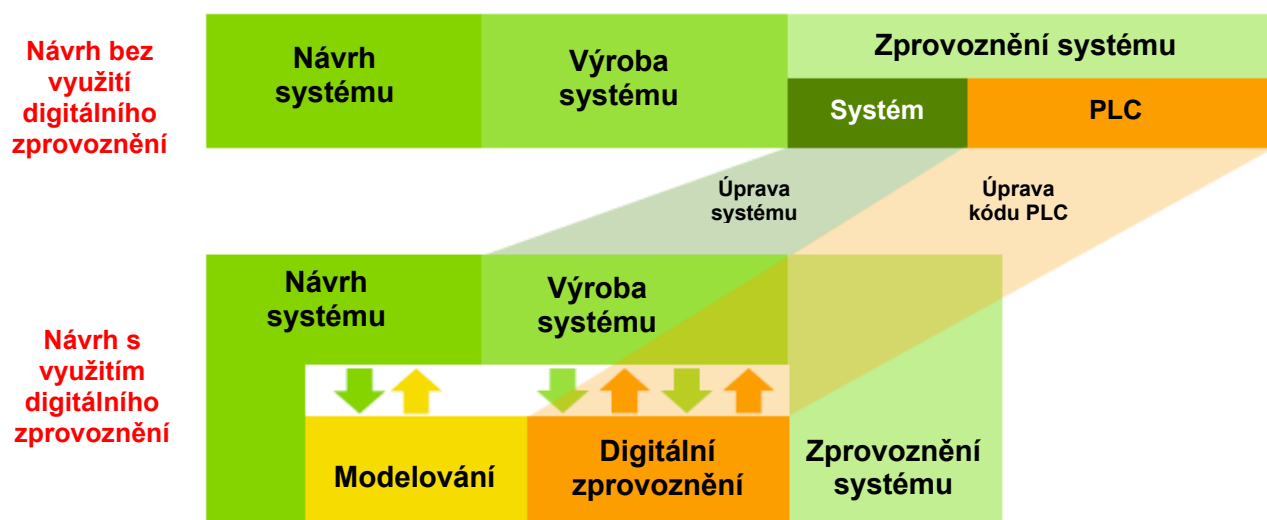
Proces zprovoznění automatického pracoviště začíná konceptuálním návrhem, který je následně detailně rozpracován, systém je naprogramován, sestaven a uveden do provozu. V tomto procesu je běžné, že se objevují chyby a tvůrce systému se musí iterativně vracet k předchozím krokům a chyby odstraňovat. Je proto důležité věnovat značnou pozornost kvalitnímu návrhu s cílem předejít následným úpravám, které by zdržely uvádění výrobního systému do provozu. V kontextu Průmyslu 4.0 a neustále se zrychlujícího světa a jeho potřeb se tak stává standardem digitální, či také virtuální zprovoznění, které využívá softwarových nástrojů pro kompletní zprovoznění, otestování a odstranění chyb před samotnou fyzickou realizací. [32]



Obr. 15 Náklady na opravu chyb v závislosti na době objevení chyb [33]

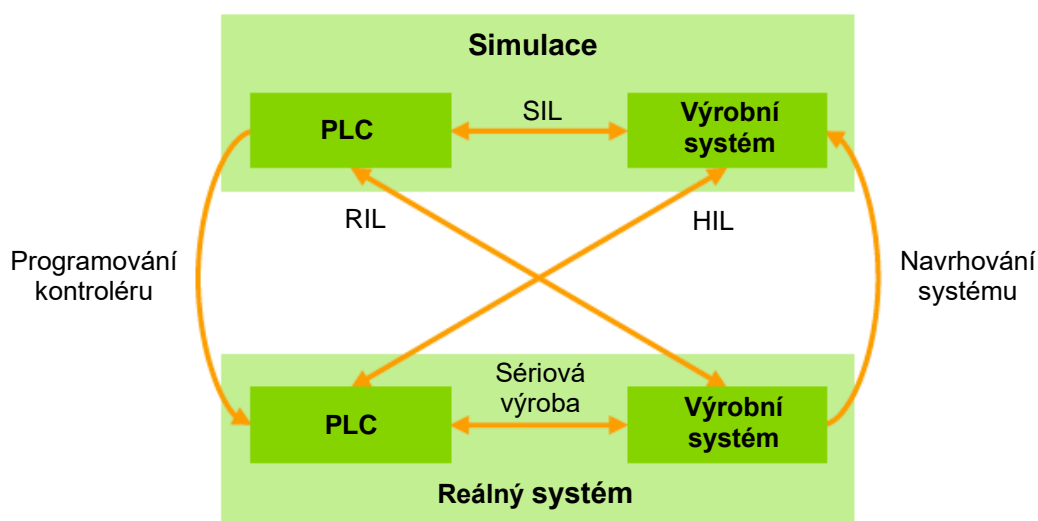
Obr. 16 ukazuje rozdíl mezi inženýrským procesem s využitím digitálního zprovoznění a bez něj. Pokud je zvolen nemoderní přístup, musí být výrobní systém nejprve vyroben a až následně může začít proces detekce nesrovnalostí a chyb v konstrukci. Tento přístup značně oddaluje okamžik spuštění systému v ostrém provozu a zvyšuje celkové náklady.

Moderním přístupem s využitím digitálního zprovoznění, které lze provádět paralelně s výrobním a montážním procesem je možné ušetřit cenný čas a prostředky. V optimalizační smyčce je systém opakovaně testován a chyby jsou tak odstraňovány rychleji a nezávisle na fyzickém systému. Tento přístup přináší také bezpečnější uvedení do provozu, protože předchozí zjištěné chyby jsou vyřešeny před uvedením do ostrého provozu a nehrozí zranění obsluhy či poškození součástí. [34]



Obr. 16 Porovnání přípravy výrobního systému s a bez digitálního zprovoznění [34]

2.9.1 Způsoby digitálního zprovoznění



Obr. 17 Způsoby digitálního zprovoznění [34]

Obr. 17 přehledně zobrazuje a shrnuje různé přístupy k digitálnímu zprovoznění. Digitální zprovoznění vždy pracuje s digitálním modelem, který je propojen s řídicím systémem různými způsoby. Jestliže pracujeme s reálným fyzickým kontrolérem, pak hovoříme o hardware-in-the-loop (HIL) simulaci. Takto připravená simulace může být následně snadno přenesena na reálný systém s využitím již využitého kontroléru.

Jestliže fyzický kontrolér není k dispozici, lze i jej simulovat – pak se jedná o software-in-the-loop (SIL) simulaci. Fakt, kdy reálný kontrolér není vyžadován, může proces přípravy zlevnit a je to největší benefit tohoto přístupu. Jako nevýhodný se tento přístup ukazuje při řešení složitějších úloh, kdy výkon simulace nemusí stačit.

Mimoto, lze pracovat i v situaci přesně opačné, tedy reálný systém či stroj ovládat ze simulovaného kontroléru. Tento způsob je obecně nazýván reality-in-the-loop (RIL) simulací a také nachází uplatnění v reálných aplikacích. [34]

2.9.2 Nástroje pro digitální zprovoznění

Jak vyplývá z dříve uvedeného, digitální zprovoznění je trend, což si uvědomují dodavatelé technologií a řešení pro přípravu výrobních procesů. V poslední době tak vzniká sofistikovaný software, určený pro snadný a rychlý návrh výrobních procesů. Cílem je ve virtuálním prostředí proces připravit a odladit tak, aby doba následného zprovoznění byla zkrácena na nutné minimum a mohl výrobní proces co nejdříve přinášet hodnotu a zároveň se mohla navracet investice do něj vložená.

Nejnámější výrobci robotů nabízejí svým zákazníkům software pro off-line programování jejich produktů s cílem motivovat je pro nákup jejich řešení. Příkladem takových balíků je ABB RobotStudio, KUKA Sim či FANUC Roboguide od výrobců robotů. Tyto balíky jsou primárně zaměřeny pro simulaci robotických buněk, existují však i komplexnější nástroje pro plánování chodu celé výroby a životního cyklu výrobku, počínaje jeho výrobou až po jeho expedici. Takovým řešením je například Technomatix Process simulate od Siemens.

2.9.3 ABB RobotStudio

Pro realizaci této závěrečné práce byl jako nástroj pro digitální zprovoznění zvolen softwarový balík ABB RobotStudio. Jedná se o ucelený balík nástrojů pro vytváření, simulaci a testování kompletních robotických instalací ve virtuálním prostředí. Software je koncipován modulárně, kdy obsahuje základní moduly pro modelování, simulaci, programování i následné odladění s možností rozšíření pomocí zpoplatněných modulů.

Pro snadné modelování je v balíku zahrnuto celé portfolio produktů společnosti ABB, které mimo robotů obsahuje i pohonné jednotky, uchopovače či senzoriku. Všechny modely jsou doplněny o fyzikální vlastnosti, takže jejich chování v simulacích z pohledu kinematiky i dynamiky odpovídá realitě. Mimo vložené modely lze importovat širokou škálou běžně využívaných CAD formátů a vytvořit tak plnohodnotné simulace.

Software je schopen simulovat celé robotické kontroléry, díky čemuž je možné připravené řešení poté nahrát do reálného systému, který bude chováním odpovídat virtuálnímu. To je možné i díky simulaci času, kdy časy operací korespondují s realitou. Tvůrce má k dispozici řadu pomocných nástrojů, které dokážou analyzovat dosahy, automaticky předcházet kolizím či vizualizovat tok dat napříč systémem, takže je minimalizováno riziko vzniku chyb. RobotStudio reaguje na aktuální trendy a situaci, kdy obsahuje také moduly pro spolupráci a vizualizaci ve virtuální realitě. Umožňuje tak uživatele společně s kolegy z celého světa přenést do virtuálního prostředí a zprostředkovat mu pohled na navrhované řešení. [35]



Obr. 18 Virtuální plánování výroby s ABB RobotStudio [35]

Možnosti balíku lze ještě dále rozšiřovat pomocí placených balíčků PowerPacs, které jsou často zaměřeny na a značně usnadňují tvorbu systému využívající určitý technologický proces, např. svařování či lepení. Všechny balíčky jsou vytvořeny přímo společností ABB, takže je zaručena plná kompatibilita a funkčnost. V roce 2020 vyšel PowerPac zaměřený na využití robotu pro 3D tisk. Balíček obsahuje potřebné funkce pro zpracování modelu a převod do pohybových instrukcí robotu. Návrh tiskového procesu je díky tomu snadný a byl využit i v rámci této práce, detailní popis práce s tímto balíčkem bude popsán v kapitole 5.

Pro tyto důvody bylo RobotStudio ve verzi 2020.3 vybráno jako vhodný nástroj pro realizaci této práce.

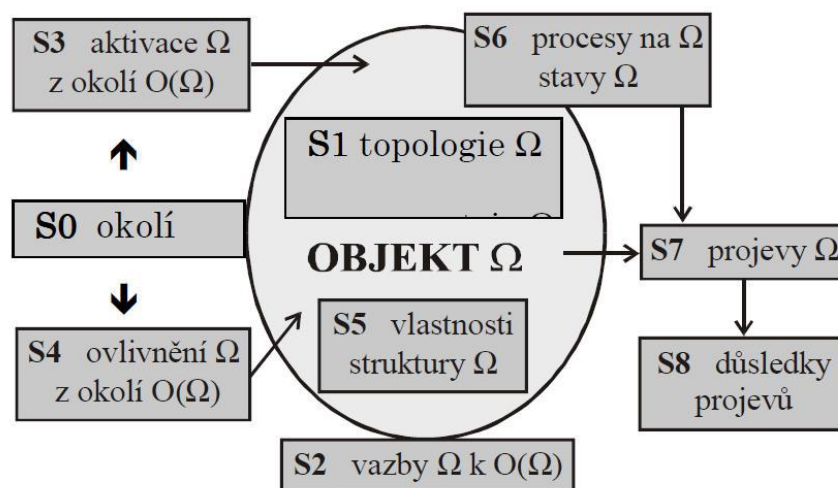
3 SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

3.1 Formulace cílů a řešení práce

V předchozích kapitolách byly představeny možnosti 3D tisku z betonu, který s využitím pokroku v automatizaci může výrazně ovlivnit stavební průmysl. V rámci této závěrečné práce bude digitálně zprovozněno robotické pracoviště, které by mělo být schopné automatického 3D tisku z betonu s použitím robotu. To zahrnuje automatické zpracování, transport a pokládání směsi dle tiskového programu. Pracoviště by mělo být umístěno v interiéru a není uvažováno pro využití ve venkovních podmínkách. Součástí práce nebude návrh složení tiskové směsi, pracoviště však bude připraveno na experimentální testování směsi při fyzické realizaci.

3.2 Systém podstatných veličin

Prvním krokem systémového rozboru by mělo být určení systému podstatných veličin, který je podstatnou součástí systémového přístupu. Je definován jako souhrn všech veličin, které jsou důležité pro řešení daného problému. Při jeho tvorbě je nezbytné zohlednit všechny podstatné okolnosti, které do řešení vstupují a přímo jej ovlivňují. Opomenutí některé z podstatných veličin může vést k neúspěšnému řešení. [36]

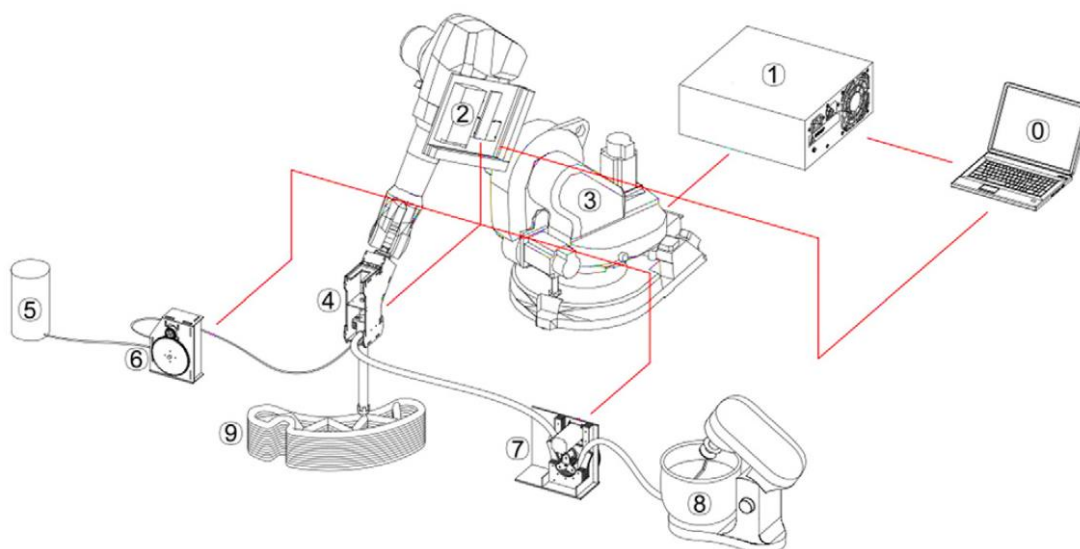


Obr. 19 Schematické vyjádření systému podstatných veličin [36]

Objektem Ω je navrhované robotické pracoviště pro 3D tisk z betonu.

- **Podmnožina objektu Ω S0 – okolí objektu; environmentální veličiny**
 - pracoviště je připraveno pro práci v interiéru v ideálních podmínkách bez vnějších vlivů, teplota okolí je v čase i prostoru proměnná, okolí objektu není nijak modelováno.
- **Podmnožina objektu Ω S1 – geometrie a topologie objektu; objektové veličiny**
 - jsou definovány rozměry, rozložení a jednotlivé prvky robotického pracoviště.
- **Podmnožina objektu Ω S2 – podstatné vazby objektu k okolí; vazbové veličiny**
 - robotické pracoviště je navrženo pro práci v hale s dodržением všech bezpečnostních předpisů.
- **Podmnožina objektu Ω S3 – aktivace objektu z jeho okolí; aktivační veličiny**
 - robotické pracoviště je připraveno pro ovládání obsluhou skrze intuitivní uživatelské rozhraní.
- **Podmnožina objektu Ω S4 – působení z okolí na objekt; ovlivňující veličiny**
 - na objekt okolí nijak nepůsobí, prázdná množina.
- **Podmnožina objektu Ω S5 – vlastností prvků struktury objektu; strukturně-vlastnostní veličiny**
 - jsou zvoleny správně nadimenzované prvky pracoviště, které umožňují dosáhnout automatického tisku,
 - robotické pracoviště je připraveno pro experimentální testování tiskové směsi, kdy cílem je dosáhnout jejích ideálních vlastností.
- **Podmnožina objektu Ω S6 – procesy probíhající na struktuře objektu a jeho stavy; procesní veličiny a stavové veličiny**
 - pracoviště je schopno na základě nastavení obsluhy dle zadaných pohybových instrukcí vytisknout požadovaný objekt.
- **Podmnožina objektu Ω S7 – projevy objektu; projevové veličiny**
 - jestliže tiskový program neobsahuje chyby, je zahájen tiskový proces, který vytlačováním směsi tvoří požadovaný objekt.
- **Podmnožina objektu Ω S8 – důsledky projevů objektu na jeho okolí nebo na něho samého; důsledkové veličiny**
 - je-li dodrženo správné složení směsi po celou dobu tisku, dokončením tiskového procesu vznikne požadovaný objekt.

3.3 Součásti pracoviště



Obr. 20 Schéma robotického pracoviště pro 3D tisk [37]

Na Obr. 20 je zobrazeno pracoviště určené pro 3D tisk z betonu, které obecně zahrnuje tyto základní součásti:

- | | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| 1) Řídicí systém | 6) Čerpadlo pro urychlovač |
| 2) Řadič tisku | 7) Čerpadlo pro betonovou směs |
| 3) Robot | 8) Míchačka směsi |
| 4) Tisková hlava (extruder) | 9) Tištěný objekt |
| 5) Urychlovač | |

Vyobrazené schéma je obecné a robotické pracoviště je možné realizovat i v jiných provedeních, kdy nemusí být využity všechny výše uvedené prvky. Nutným základem pro tiskové pracoviště představují tři hlavní komponenty: míchačka směsi s čerpadlem, tisková hlava a systému řízení pohybu. V míchačce dochází ke smíchání vody se suchou směsí o různém složení, čímž vznikne beton. Ten je čerpadlem čerpán do hadice, na jejímž konci dosáhne tiskové hlavy, která obstarává správné pokládání jednotlivých vrstev materiálu. Za pohyby tiskové hlavy je zodpovědný pohybový systém, který dle instrukcí programu z řídicího systému přemísťuje tiskovou hlavu na správná místa. Méně často je v pracovišti zahrnuto druhé čerpadlo dodávající příměsi.

3.4 Tiskový materiál

Betonová směs vhodná pro 3D tisk musí splňovat zásadní kritéria, která mají přímý vztah s metodikou tisku betonu.

Definují se tato nejdůležitější měřitelná kritéria směsi:

- Extrudovatelnost, tekutost – tyto úzce svázané pojmy souvisí s vytlačováním směsi, kdy je potřeba dosáhnout kontinuální, snadno tekoucí pasty, jejíž vytlačování z trysky nepřetěžuje čerpadlo.
- Stavitelnost, pevnost v tlaku, pevnost v tahu – týkají se schopnosti betonové vrstvy udržet další vrstvy nad ní, aniž by se zhroutila. Přitom je nutné zaručit dostatečnou pevnost betonu v tlaku při vysoké pevnosti v tahu.
- Otevřený čas – tento pojem vyjadřuje změnu tekutosti betonu v čase. Cílem je zajistit, aby každá vytisknutá vrstva měla schopnost se neroztékat, ale přitom zůstat dostatečně tekutá a spojit se s vrstvou nad ní. [38]

Klasický stavební beton není možné pro 3D tisk využít, neboť nesplňuje požadavek na dostatečnou pevnost v tahu. Proto vznikla samostatná skupina betonů s vysokou pevností Ultra High Performance Concrete (UHPC). Jde o kompozitní materiály na bázi cementu, které vynikají nízkou pórovitostí, díky které dosahují vysoké pevnosti v tahu.

O kvalitě směsi a výsledku tisku ve velké míře rozhoduje vodní součinitel, tedy poměr obsahu vody k hmotnosti cementu. Hodnota součinitele se běžně pohybuje v rozmezí 0,3 – 0,6. Čím je jeho hodnota nižší, tím lepší mechanické vlastnosti směs vykazuje a má vyšší pevnost. Hodnotu součinitele je v případě směsi pro 3D tisk nutné udržet nad hodnotou 0,4, neboť směs s nižším součinitelem by nesplňovala požadavky na tekutost. [39, 40]

Do směsi se často přidávají přísady, které umožňují upravovat její vlastnosti:

- Plastifikátory – snižují vodní součinitel (dokonce pod 0,3) při zachování dobré zpracovatelnosti.
- Akcelerátory (urychlovače) – ve směsi mají za úkol zkrátit čas tuhnutí a zvýšit počáteční pevnost v tlaku.
- Retardéry (zpomalovače) – jsou opakem akceleratorů, tedy prodlužují čas tuhnutí. V praxi se využívají v teplých prostředích, ve kterých je potřeba zaručit dostatečný čas mezi mícháním směsi a jejím nanášením. [41]

Na trhu jsou již nyní dostupné průmyslově vyráběné směsi od společností Baunit, Weber či BASF, garantující stálé vlastnosti pro účely 3D tisku, avšak jsou finančně velmi nákladná. Výzkumné týmy, které pracují na vlastních tiskových pracovištích, proto často navrhují vlastní směsi a hledají ideální poměr složek. Nesprávné složení totiž může vést k nežádoucí degradaci směsi a tím i výsledku. Vzhledem k povaze závěrečné práce, kdy nebude pracoviště fyzicky realizováno, nebude složení vlastní směsi řešeno. Pro správné nastavení složení směsi je nutné zohlednit mimo mechanické vlastnosti i okolní prostředí (teplotu, vlhkost atp.), které v použitých nástrojích není možné simulovat.



Obr. 21 Zkroucené vrstvy po tisku s nevhodně nastavenou směsí [24]

3.5 Míchání a čerpání materiálu

Zařízení na míchání a dodávání materiálu k místu tisku je klíčový prvek pracoviště rozhodující o kvalitě výsledného tisknutého objektu. Je nutné zajistit stálé vlastnosti směsi po celou dobu tisku s možností ovlivnění rychlosti dodávání směsi, případně i složení směsi. Pro tento účel se využívají tzv. směšovací čerpadla, která jsou uvedené požadavky schopna splnit.

Směšovací čerpadla nejsou novinkou, neboť se běžně využívají jako omítací stroje, či pro čerpání pastózních materiálů. Jejich výhod si však velmi brzy všimly výzkumné týmy studující možnosti 3D tisku z betonu a začleňují je do svých systémů. Příkladem oblíbených zařízení jsou m-tec duo-mix 2000 a MAI MULTIMIX-3D.

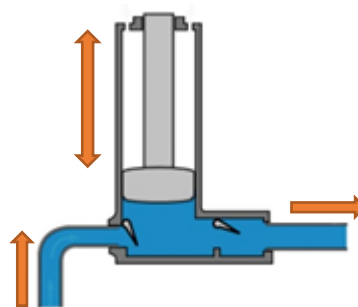
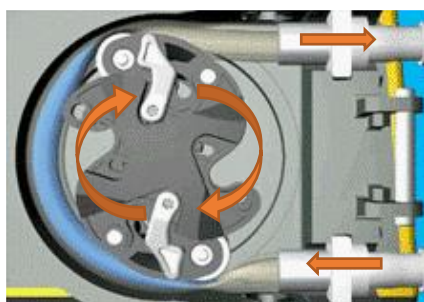


Obr. 22 a) m-tec duo-mix 2000 (vlevo) [42], b) MAI MULTIMIX-3D (vpravo) [43]

Směšovací čerpadla mají směšovací a čerpací agregáty odděleny a poháněny zvlášť. Suchá směs je do zařízení dodávána obsluhou z pytlů, či v případě potřeby většího množství směsi z napojeného sila. Směšovací agregát se skládá ze dvou směšovacích komor. V první komoře se suchý materiál vsype do vody a předmíchá se. V druhé komoře se předmíchaný materiál domíchává. Takto lze rovnoměrně namíchat i extrémně jemnozrnný materiál. Pro správné spojení všech složek směsi je využívána technologie

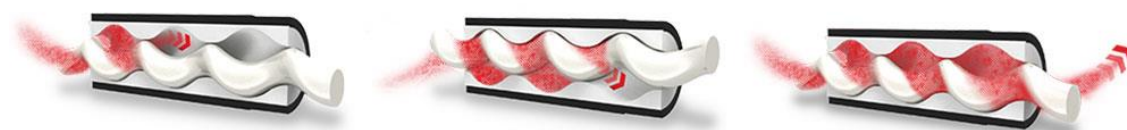
přimíchávání materiálu do vody. Nedochází ke stříkání vody na materiál, nýbrž materiál se syje do vodní lázně a míchá. Výsledkem je jemně rozmíchaná stavební směs plně propojená s přísadami. Zařízení je schopno samostatného řízení vody pomocí zabudovaného průtokoměru a manometru vodního tlaku. Ten stroj vypne automaticky v okamžiku, kdy je tlak vody nedostatečný. V opačném případě nízkého přívodního tlaku má zařízení k dispozici vodní čerpadlo zajišťující činnost bez odstavení. [44]

Po umíchaní stavební směsi je nutné směs dopravit na místo aplikace pomocí čerpadla. Ve stavební praxi se běžně využívají peristaltická či pístová čerpadla, která jsou oblíbená pro svůj jednoduchý funkční princip a schopnost vyvinout velký tlak. Pro využití k 3D tisku však vhodná nejsou, neboť neumí dodávat směs kontinuálně, pouze v dávkách v jednotlivých pracovních cyklech. [45]



Obr. 23 a) Peristaltické čerpadlo (vlevo), b) pístové čerpadlo (vpravo) [45]

Pro zajištění stálého přísunu směsi do tiskové hlavy proto směšovací čerpadla využívají excentrické šroubové čerpadlo. To se sestává ze spirálového statoru, uvnitř něhož se otáčí uvnitř spirálový rotor, který přenáší materiál prostřednictvím postupu řady malých samostatných dutin s pevným tvarem. Tím je zajištěno kontrolované vytlačování směsi s regulovatelnou rychlostí, bez ztrát, přetékání a s možností využití vysoce viskózních materiálů. [46]



Obr. 24 Princip fungování excentrického šroubového čerpadla [46]

3.6 Tisková hlava

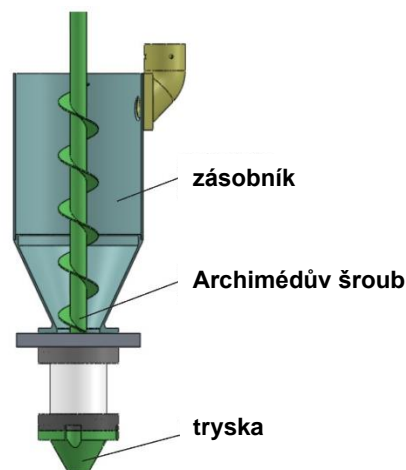
Dalším klíčovým prvkem, který má nemalý vliv na vlastnosti extrudované směsi, je tisková hlava. Průměr trysky tiskové hlavy je vždy nutné navrhovat s ohledem na složení směsi – pevné části v ní obsažené ovlivňují tekutost a správný průměr trysky umožňuje ideální průtok směsi. Z uvedeného vyplývá, že je nutné návrhu trysky věnovat stejnou pozornost jako složení směsi, aby bylo dosaženo uspokojivého výsledku tisku. Využívají se dva typy tiskových hlav – pasivní a aktivní.

Jak z názvu vyplývá, pasivní tisková hlava sama žádnou činnost nevykonává. Jde o poslední část tiskového zařízení, která zajišťuje pokládání na podložku. Tisková hlava musí být uzpůsobena na připojení přívodní hadice o daném průměru, kterou je dodávaná směs. Vytlačování materiálu je řízeno čerpadlem, samotná tisková hlava není schopna ovlivnit množství či složení směsi. Je proto vhodné využívat pasivní tiskové hlavy pro tisk kontinuálních tiskových cest, neboť při snaze jejím prostřednictvím tisknout menší segmenty s přerušováním přísunu směsi by docházet k nechtěným úkapům. [38]



Obr. 25 Pasivní tisková hlava [47]

Pro větší kontrolu nad tiskovým procesem se využívá aktivní tisková hlava. Jako příklad zde bude blíže popsána tisková hlava systému Bauminator od společnosti Baunit. Prvním benefitem je možnost změny průměru trysky v průběhu tisku a ovlivňovat tak sílu stěny objektu. Praktická je také schopnost samostatného čištění – pokud dojde k přerušení přívodu směsi do dobu delší než 5 minut, hlava spustí proces automatického čištění, aby nešlo k jejímu zničení. V neposlední řadě je hlava schopna zlepšovat směs pomocí přísad, které umí dávkovat. Oproti pasivní hlavě je tisk segmentů jednoduchou záležitostí, hlava disponuje automatickým start / stop systémem, který je realizován ventilem. [48] Existují i jiné typy aktivních hlav, kde je regulace zajištěna rotorem ve tvaru Archimédova šroubu integrovaným v hlavě, viz. Obr. 26 b).



Obr. 26 a) Aktivní tisková hlava systému Bauminator (vlevo) [48], b) tisková hlava s Archimédovým šroubem (vpravo) [47]

Významný vliv na kvalitu tisku má také tvar trysky. Dle zvolené tiskové technologie může být konec tiskové hlavy opatřen závitem pro přidání tvarované trysky s hladítky, která zabráňují hromadění materiálu a nerovnoměrnému nanášení. Nejčastěji se kombinují boční a horní hladítka. Boční hladítka na vnějších stranách slouží k narovnání betonu, který by se bez nich měl tendence rozlévat. Horní hladítko je dokončovací a slouží k vyrovnání horního povrchu betonové vrstvy pro zajištění maximální stavitelnosti dalších vrstev. Tvar trysky významně ovlivňuje výsledný tisk a existují studie zaměřující se pouze na tuto část celého pracoviště. V rámci této práce není tryska s hladítky uvažována.



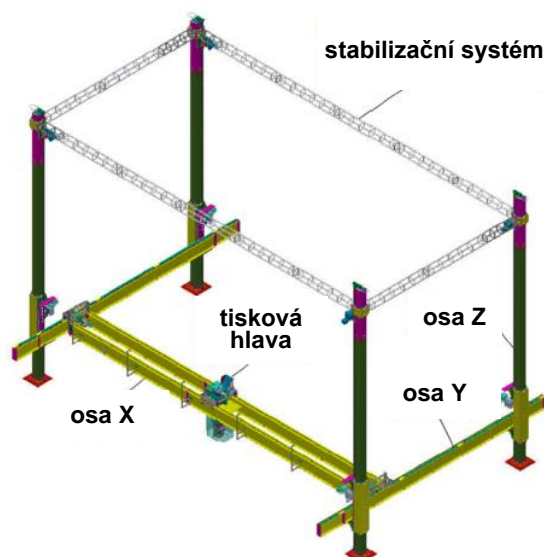
Obr. 27 Příklady tvarovaných trysek [49]

3.7 Pohybový systém

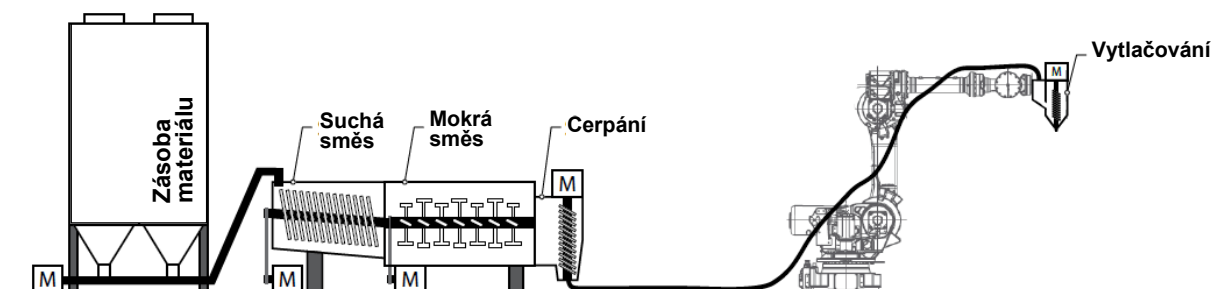
Zásadní výhodou 3D tisku je schopnost tisknout složité tvary bez potřeby forem a bednění. Aby bylo možné zhmotnit 3D model objektu, je nutné zajistit schopnost pohybu tiskové hlavy ve více osách.

V jednodušších pracovištích se využívá kartézský robot, jenž se skládá ze 3 navzájem kolmých os. Pro jejich realizaci se využívají portálové konstrukce, které definují trasy jednotlivých os a sestávají se z lineárních akčních členů. Můžeme se s nimi setkat na pracovištích s větší plochou tisku a bez potřeby naklánění tiskové hlavy. Existují však i řešení se 4 stupni volnosti, kde je tisková hlava výklopná. [50]

Pro tisk složitějších tvarů se v pracovištích uplatňují šestiosé průmyslové roboty. Dle požadavků se umísťují na podlahu, podstavec, mohou být zavěšeny na portálové konstrukci či uchyceny na lineárním pojezdu. Díky jejich dosahu a pohybovým schopnostem lze realizovat složité struktury na malé ploše, což činí výsledná pracoviště praktičtějšími. Roboty jsou často nejnákladnějším prvkem celého pracoviště.



Obr. 28 a) Pracoviště využívající portálovou konstrukci (vlevo) [50], b) pracoviště s robotem na pojezdu (vpravo) [51]



Obr. 29 Schéma celého tiskového procesu se šestiosým robotem [45]

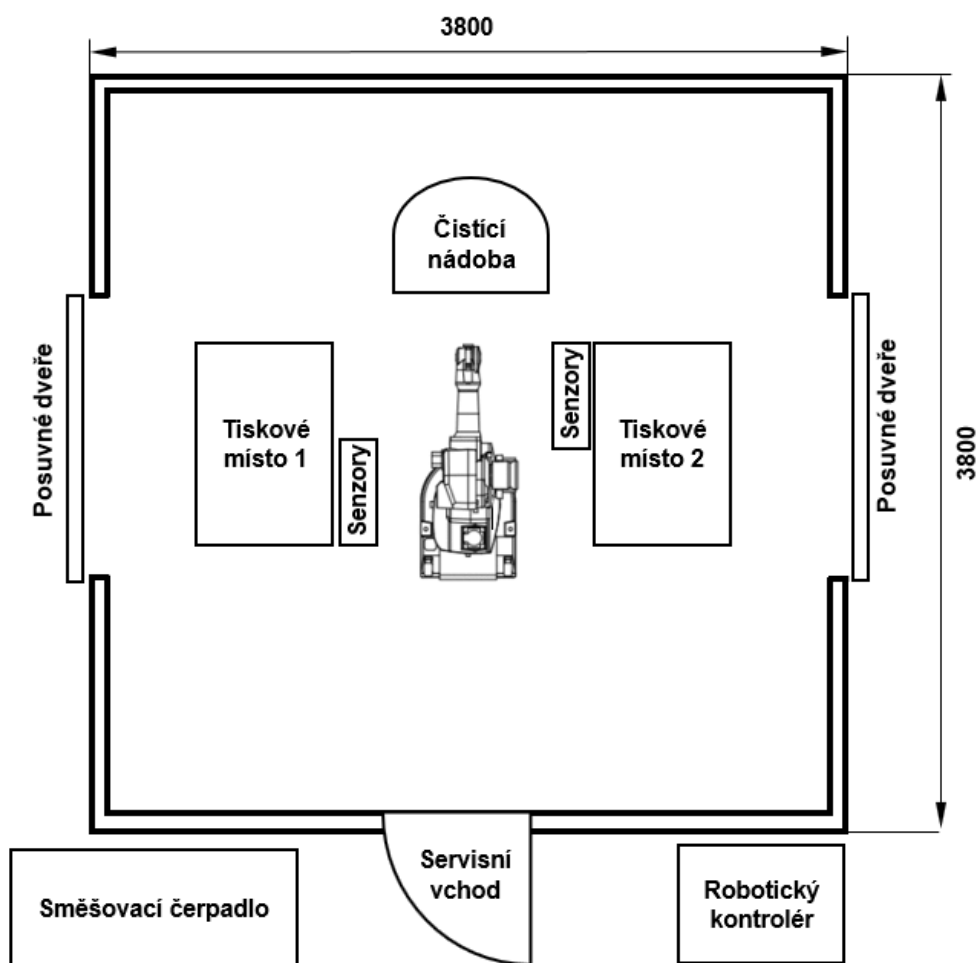
4 SESTAVENÍ PRACOVISTĚ

4.1 Návrh pracoviště

V rámci předchozí kapitoly byly identifikovány klíčové součásti, které jsou nutné pro realizaci pracoviště. S touto znalostí je prvním krokem digitálního zprovoznění návrh pracoviště s výběrem konkrétních prvků a technologií, které budou utvářet finální řešení.

Finální pracoviště se skládá z robotu, tiskové hlavy, 2 tiskových míst, místa určeného pro čištění zařízení po dokončení tisku, bezpečnostního oplocení se 3 vstupy (1 servisní vstup, 2 vstupy pro odebrání vytištěných objektů) a volně stojícího čerpadla pro snadný dosah obsluhy.

Pracoviště je plánováno především pro experimentální užití ve výuce a výzkumu. Nebude součástí většího výrobního procesu, nemusí zohledňovat materiálový tok a nejsou na něj kladeny požadavky v délce časového cyklu, proto nebyl proveden návrh více variant a vyhodnocení nejvhodnější z nich.

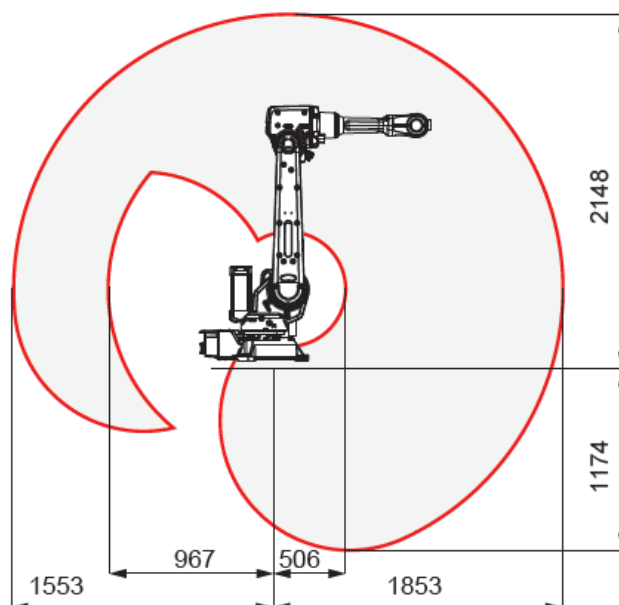


Obr. 30 Schéma pracoviště

4.2 Výběr prvků pracoviště

4.2.1 Robot

Vzhledem k tomu, že je digitální zprovoznění prováděno pomocí software ABB RobotStudio, bude využit robot z portfolia ABB. Při výběru robotu byl kladen důraz především na jeho dosah, kdy je nutné dosáhnout na všechna místa obou tiskových míst. Jako podložka bude na obou tiskových místech použita EURO paleta o rozměru 1200 x 800 mm. Jako vhodný robot splňující požadavky byl shledán robot ABB IRB 2600-12/1.85, tedy ve variantě s dosahem horního ramene 1,85 m. Bylo by samozřejmě možné využít robota s větším dosahem, který by obsloužil více tiskových míst, ale vzhledem k celému tiskovému procesu, kdy se robot věnuje vždy jednomu objektu, by větší robot nepřinesl zásadní výhody a pouze by zvyšoval finanční náročnost realizace pracoviště.



Obr. 31 Pracovní dosah robotu ABB IRB 2600-12/1.85 [52]

4.2.2 Tisková hlava

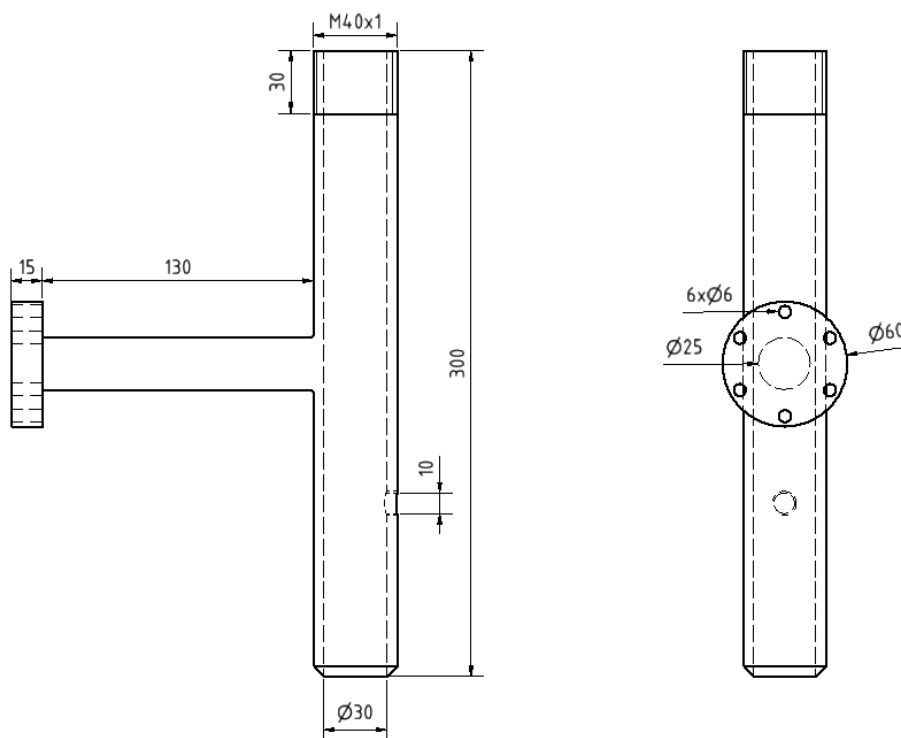
Pro pracoviště byla navržena jednoduchá pasivní tisková hlava, která splní požadavek pro připojení čerpadla (prvky spojeny hadicí, zajištěno závitem) a umožní vytlačování směsi na podložku. Hlava je připravena ke spojení s přírubou robotu šrouby. Ve skutečnosti by se jednalo o svařenec z hliníku s přibližnou hmotností 1 kg a tiskovým průměrem 30 mm, v simulaci byla využita zjednodušená varianta.

Přestože je směšovací čerpadlo schopno zpětné vazby do řídicího systému, který informuje o tom, že směs je vytlačována, může z důvodu špatného čištění z předchozího tisku či jinou překážkou vzniknout v hadici ucpávka. Tím může dojít k zastavení vytlačování a v nejhorším případě hrozí zničení hadice vzniklým přetlakem a tím poškození celého pracoviště. Konec tiskové hlavy je proto vhodné vybavit hlídačem průtoku, který řídicí systém upozorní, pokud přestane směs proudit. Pro pracoviště byl

vybrán hlídač COMAC CAL FS 10, který pracuje na kalorimetrickém principu měření a určuje rychlost proudění podle přenosu tepla ze snímače. Hlídač se chová jako spínač – pokud směs protéká, je sepnutý, v opačném případě je rozepnut. Pro montáž hlídače je připraven otvor se závitem, skrze který se zavede snímač do vnitřního prostoru hlavy. [53]



Obr. 32 a) Hlídač průtoku FS 10, b) způsob instalace hlídače průtoku



Obr. 33 Pasivní tisková hlava, vlastní návrh

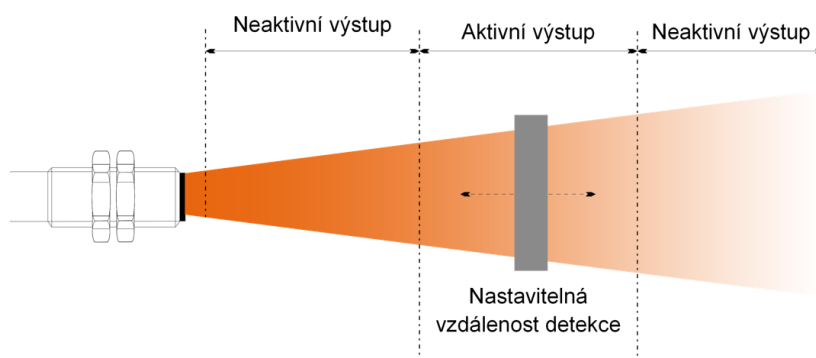
4.2.3 Směšovací čerpadlo

Z rešerše vyplynulo, že vhodným čerpadlem bude již dříve zmíněné m-tec duo-mix 2000, viz. kapitola 3.5. Stroj v této variantě byl využit i při tisku prvního českého domu vytvořeného 3D tiskem Prvok, viz. kapitola 2.5, což dokazuje jeho schopnosti. Další motivací k jeho využití byla vstřícná spolupráce českého dodavatele technologií m-tec, který laskavě poskytl kompletní 3D model čerpadla včetně potřebných materiálů pro popisující zprovoznění a komunikaci s řídicím systémem. Pro tyto skutečnosti bude součástí i navrhovaného pracoviště.

Čerpadlo je řízeno řídicím systémem pracoviště, počítá se pouze s ručním doplňováním směsi obsluhou, zbytek procesu bude automatický. Čerpadlo bude samo udržovat správnou konzistenci směsi a dle pokynů řídicího systému, který bude ovládat zahrnutý frekvenční měnič, bude směs v požadované rychlosti vytlačována.

4.2.4 Senzorika

Přestože je díky hlídači průtoku kontrolováno správné vytlačování směsi, bude pracoviště doplněno o 3 difúzní optické senzory na každém tiskovém místě pro kontrolu nanesení vrstvy ve správné výšce. Difúzní senzor má vysílač i přijímač v jednom těle a není tak nutné využití odrazky nebo dalšího členu. Paprsek vycházející z vysílače se odrazí od předmětu s odlišnou světelnou intenzitou, což vyvolá sepnutí. [54] Senzory budou snímat prostor, ve kterém by se při správném vytlačování měla nacházet horní hrana vrstvy. Před zahájením tisku předmětu bude nanesena testovací linie před těmito senzory. Jestliže bude na všech 3 snímačích detekována vrstva, bude test vyhodnocen jako úspěšný a tisk bude zahájen. Čtvrtý senzor stejného typu bude pracoviště informovat o přítomnosti palety. V pracovišti budou využity senzory ifm O5H5000, umístěné na upravené zarážce palety.



Obr. 34 Princip fungování difúzního optického senzoru [54]

4.2.5 Bezpečnost

Pohybující se robot i v malé rychlosti představuje pro člověka velké nebezpečí, je proto nezbytné zabývat se bezpečností celého pracoviště. Pro robotická pracoviště platí řada přísných norem, které mají za cíl ochránit obsluhu a majetek. Bezpečnost jakéhokoli strojního zařízení by měla být hodnocena analýzou rizik. Vyhotovení analýzy je však nad rámec této práce a byla proto provedena pouze základní opatření. Předpokládá se, že s pracovištěm bude pracovat výhradně vysoce školená obsluha známá všech bezpečnostních pravidel.

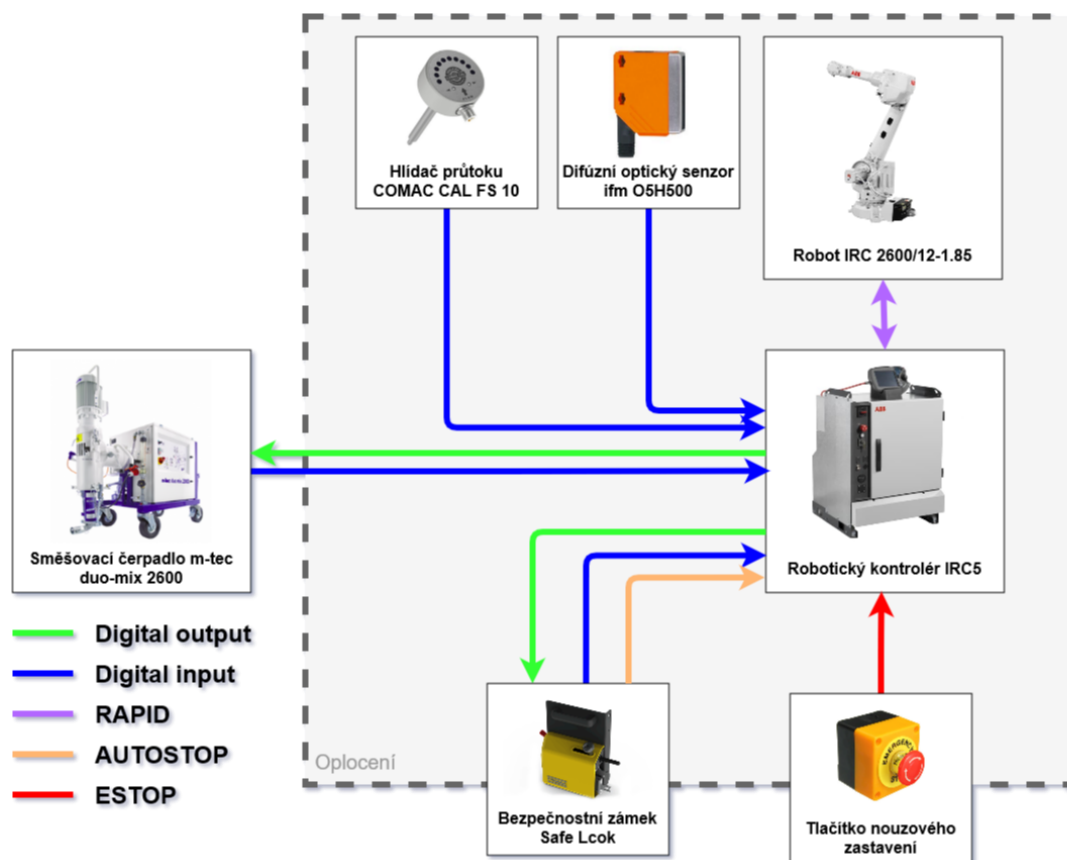
Prostor pracoviště bude ohrazen bezpečnostním oplocením Troax ST20 s výškou 2050 mm. Pro údržbu robotu je k dispozici servisní vchod s křídlovými dveřmi. Pro odebrání vytištěných objektů na paletách pracoviště disponuje dvěma posuvnými dveřmi, po otevření je vzniklý průchod dodatečně velký pro vjezd vysokozdvizného vozíku pro manipulaci s paletami. Všechny vstupy jsou vybaveny bezpečnostními zámky SafeLock, které v případě otevření okamžitě zastaví tisk. U každého vstupu je instalováno také tlačítko pro nouzové zastavení.

4.2.6 Čištění

Po dokončení tisku je nutné celý systém vyčistit, neboť zatvrdnutí zbytků směsi by mohlo nenávratně poškodit pracoviště. Tisková místa proto doplňuje místo s čistící nádobou určenou pro sběr zbytkového materiálu bez znečištění ostatních prvků pracoviště. Nádoba disponuje kolečky pro snadnou manipulaci.

4.3 Řízení pracoviště

Vzhledem k využití 3D Printing PowerPac, který je uzpůsoben pro použití s robotickým kontrolérem, bude pracoviště řízeno kontrolérem IRC5. Schématické vyjádření komunikace řídicího systému a jednotlivých součástí je vyobrazeno níže. Konkrétní provedení komunikace bude zpracováno v navazující kapitole.



Obr. 35 Schéma komunikace pracoviště

5 DIGITÁLNÍ ZPROVOZNĚNÍ

Jednotlivé komponenty pracoviště byly vydefinovány a nyní je nutné přiřadit jim vlastnosti a chování, vytvořit mezi prvky vztahy a jejich spojením utvořit funkční celek, který naplní požadovaný cíl. V jednotlivých podkapitolách bude popsán postup, jak bylo digitální zprovoznění provedeno.

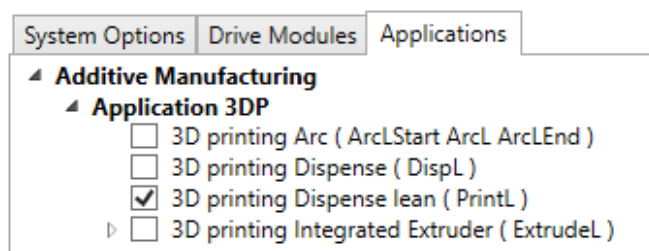
5.1 Příprava pracoviště

5.1.1 3D Printing PowerPac

Klíčovým prvkem pro realizaci digitální verze pracoviště je balíček 3D Printing PowerPac, rozšiřující možnosti návrhového software ABB RobotStudio. Jeho instalací dostane uživatel k dispozici všechny potřebné nástroje 3D tisk – od zpracování modelu, optimalizaci tiskového procesu, ovládání externích os, až po vygenerování a provedení samotného tiskového programu. Jeho tvůrcem je přímo společnost ABB, takže kompatibilita je zaručena. Doplněk je možné stáhnout přímo z webových stránek ABB a jeho instalací bylo při zprovoznění nutné začít.

5.1.2 Příprava kontroléru

Po vytvoření prázdného pracoviště v RobotStudio následovalo vytvoření nového kontroléru. V záložce *Controller* tlačítko *Installation Manager* vyvolá průvodce, který slouží ke konfiguraci kontrolérů. Stiskem tlačítka *New* začíná tvorba nového kontroléru – po zvolení jeho názvu následují důležité kroky pro další práci. V druhém kroku *Products* je potřeba zvolit *3DP*, čímž je kontrolér obohacen o tiskové funkce. Nakonec je nutné přidat instrukci *PrintL* v posledním kroku průvodce. Pak už stačí nastavení potvrdit a vytvořit virtuální kontrolér, který se stane součástí pracoviště.

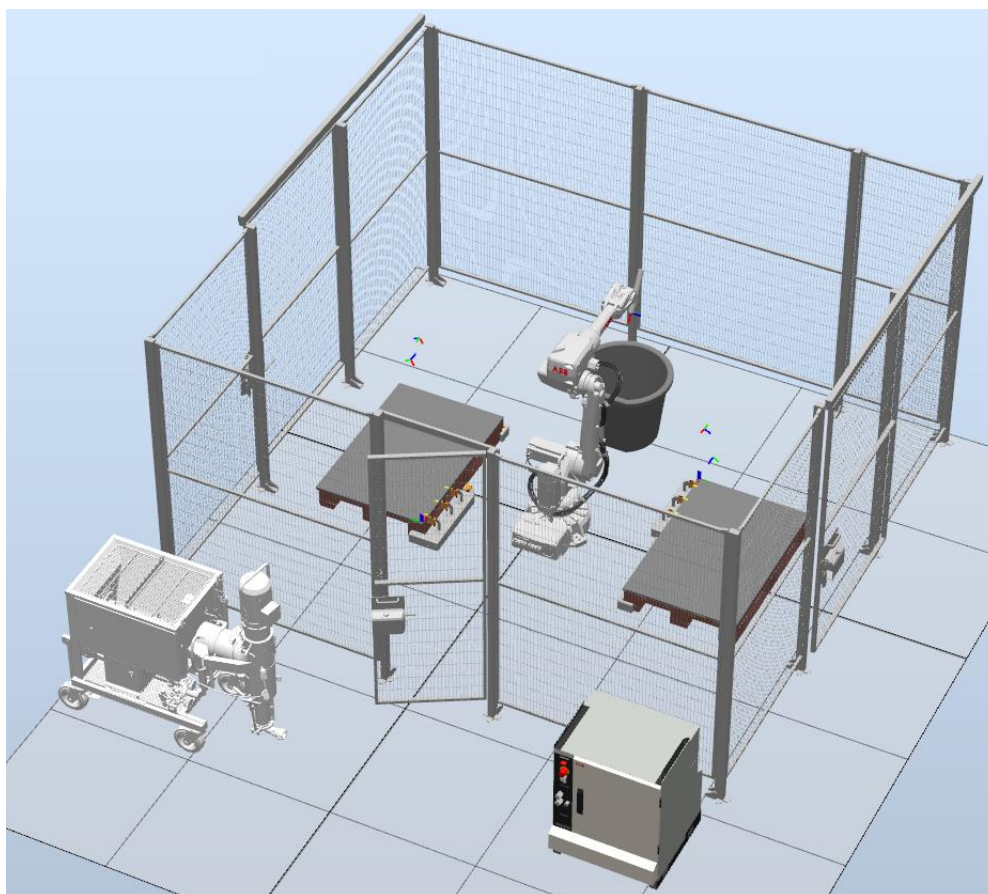


Obr. 36 Přidání instrukce PrintL

5.1.3 Import součástí

Po nastavení kontroléru následoval import modelů všech prvků pracoviště. Robot IRB 2600 je dostupný přímo v knihovně ABB RobotStudio, ostatní součásti bylo potřeba vymodelovat, případně obstarat si jejich 3D model. Přestože je RobotStudio schopné pracovat se širokou škálou formátů 3D modelů, nejvíce se osvědčil formát SAT, který zachoval všechny vlastnosti modelu.

Po rozmístění všech prvků bylo potřeba celou simulaci „oživit“. V praxi to znamená modelům určit chování a komunikaci mezi nimi pomocí nástroje *Smart Components*. Vytvořením „chytrých komponent“ lze definovat vstupní a výstupní signály jednotlivých prvků, se kterými je možné pracovat v řídicím programu. Signálová vybavenost prvků musí odpovídat jejich reálnému zástupci – je tím zaručena plná funkčnost řídicího programu a přenositelnost z virtuálního na reálné pracoviště.



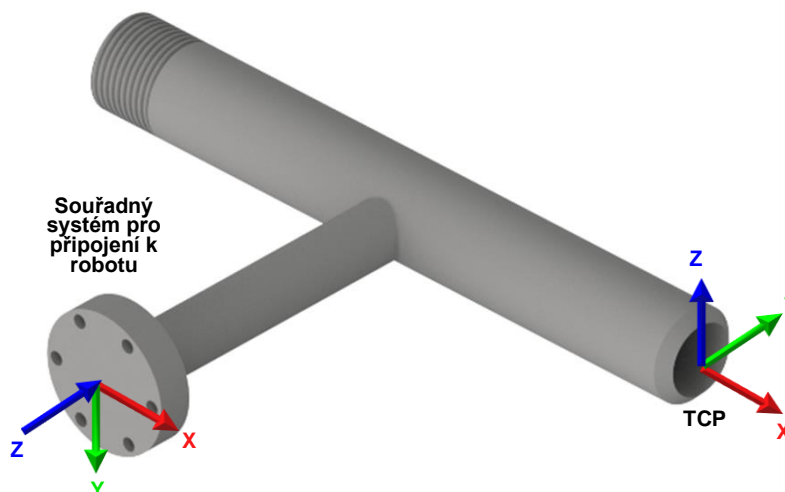
Obr. 37 Výsledný model pracoviště

5.1.4 Tisková hlava

Zjednodušený 3D model tiskové hlavy bylo potřeba pro použití v pracovišti definovat jako nástroj, který bude uchycen na robotu a bude vykonávat potřebnou výrobní činnost. Nejprve musí být určen bod, který bude reprezentovat souřadnicový systém nástroje Tool Center Point (TCP) – tedy místo, ve kterém bude směs opouštět tiskovou hlavu. Tento bod byl vytvořen tlačítkem *Create Frame* ve středu trysky, viz. Obr. 38.

Pro definici nástroje je v RobotStudio funkce *Create Tool*. Pro správné chování nástroje v simulaci je nutné dbát na správné nastavení hmotnosti a těžiště nástroje. Hmotnost byla nastavena na 1 kg a těžiště bylo určeno automaticky, kdy při nastaveném režimu výběru celé součásti, stačilo kliknout na model tiskové hlavy. V druhém a posledním kroku tvorby nástroje byl dříve vytvořený bod ve středu trysky definován jako TCP. Takto vytvořený nástroj s názvem PrintTool byl přetažením v seznamu *Layout* připojen k robotu.

Hadice spojující tiskovou hlavu s čerpadlem není v simulaci zahrnuta pro snížení výpočetních nároků simulace.



Obr. 38 Souřadnicové systémy tiskové hlavy

5.1.5 Tisková místa

V pracovišti budou dvě tisková místa s dostupnou plochou o rozměru 1200 x 800 mm. Pro tato místa bylo nutné vytvořit nové souřadné systémy pomocí *Create workobject*, ke kterým se budou vztahovat všechny body tištěného objektu. Je výhodné vytvořit si nový souřadnicový systém, protože při případné změně uspořádání pracoviště jsou body vždy vázány k tiskovému místu. Navíc nad obě tisková místa byl přidán bod pomocí *Teach Target*, do kterého robot najede před zahájením tisku. Tyto body slouží jako prevence proti situacím, kdy se robot může dostat do polohy nekompatibilní s konfigurací os.

5.1.6 Čištění

Pro zajištění co nejmenšího znečištění pracoviště po dokončení tisku byl vytvořen bod uvnitř čistící nádoby, do kterého robot sjede a zůstává v pozici až do dokončení čistění obsluhou.

5.1.7 Směšovací čerpadlo

Model čerpadla, který byl poskytnut dodavatelem technologií m-tec, v simulaci slouží pouze jako grafická reprezentace zařízení. Podstatná je komunikace mezi kontrolérem a čerpadlem. Cílem je umožnit spuštění a zastavení čerpání a také regulace rychlosti čerpání podle rychlosti pohybu TCP. Pro tento účel byla vytvořena chytrá komponenta *scCerpadlo*. Společně s modelem dodavatel čerpadla poskytl i kompletní materiály

k čerpadlu, zahrnující návod a tabulku komunikačních signálů. Na jejím základě byly vytvořeny totožné vstupy a výstupy v příslušné chytré komponentě a vznikla tak přesná digitální reprezentace zařízení.

V tabulce níže jsou popsány signály čerpadla, které bylo potřeba vytvořit pro ovládání procesu. Názvy byly voleny dle dodané komunikační tabulky, aby digitální reprezentace čerpadla odpovídala reálnému.

Tabulka 1 Signály čerpadla

Typ signálu	Název	Popis
DO	Remote_connected	Zpětná vazba o aktivním režimu vzdálené kontroly.
DO	Ready_for_operation	Zpětná vazba o připravenosti čerpadla k tisku.
DI	Remote_start	Slouží k aktivaci čerpání směsi
AI	Set_value_mixingpump	Slouží k nastavení žádané hodnoty rychlosti čerpání. Signálem je ovládán frekvenční měnič, hodnota v Hz v rozpětí 20 – 50 Hz.
AO	Actual_value_mixingpump	Zpětná vazba informující o aktuální hodnotě rychlosti čerpání.

DO = digitální výstup

DI = digitální vstup

AO = analogový výstup

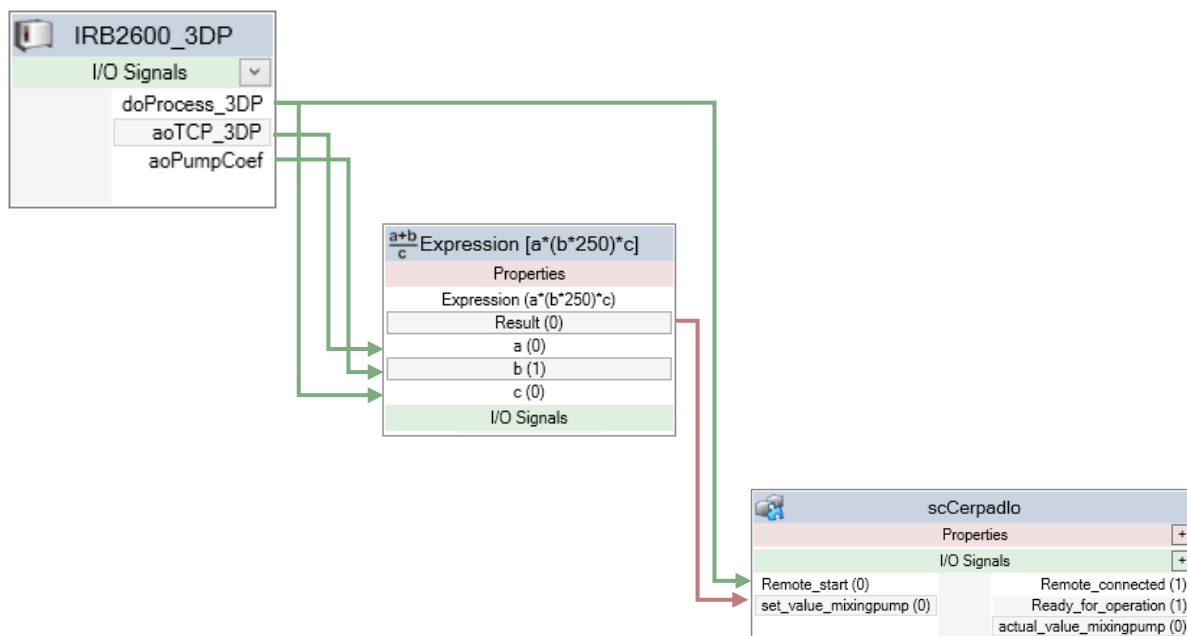
AI = analogový vstup

V rámci digitálního zprovoznění v RobotStudio není možné simulovat vlastnosti materiálů. Z toho důvodu není v práci navrhována ideální tisková směs, neboť návrh není možné validovat. Je však možné pracoviště připravit tak, aby obsluha pracující s reálným pracovištěm měla možnost snadno měnit chování pracoviště při testování složení tiskové směsi. V rešerši bylo uvedeno, že mimo složení samotné směsi výsledek tisku přímo závisí na vlastnostech tiskové hlavy, množství nanášené směsi a rychlosti pohybu hlavy. Pasivní tisková hlava má v tomto případě neměnný vliv vzhledem k pevnému průměru trysky a optimalizaci tisku je tak možné provádět správným nastavením poměru množství směsi a rychlosti robotu. S využitím dostupných signálů byl definován optimalizační poměr vyjadřující jednoduchý vztah mezi oběma veličinami.

$$f = v_{TCP} \cdot (k \cdot 250) \cdot t \quad (1)$$

V použitém směšovací čerpadle měnič pracuje v rozmezí 20 – 50 Hz. Proměnná f vyjadřuje výslednou frekvenci v Hz, na kterou bude nastaven frekvenční měnič obsažený v čerpadle. Do vztahu vstupuje rychlost TCP robotu proměnnou v_{TCP} v m/s, kterou vrací kontrolér a optimalizační koeficient k , který obsluha bude moci nastavit v uživatelském rozhraní. Pro práci s koeficientem byl vytvořen analogový výstup *aoPumpCoef*. Konstanta ve vztahu zajišťuje správný přepočet. Proměnná t nabývá hodnot 1 nebo 0 – 1 v případě tisku, 0 v klidu.

Doplňěk 3D Printing PowerPac a jím přidaná instrukce *PrintL* obohatila signálovou výbavu kontroléru o signály umožňující ovládání tiskového procesu. Důležitý je analogový výstup *aoTCP_3DP*, pomocí kterého lze informovat externí zařízení o rychlosti pohybu TCP. Informaci o tom, zda je tisk aktivní či nikoliv, zprostředkovává digitální výstup *doEquActive_3DP* – pokud je signál aktivní, tisk probíhá.



Obr. 39 Schéma komunikace optimalizace tisku

5.1.8 Tisková směs

Pro validaci správného pokládání směsi je nutné zobrazit jednotlivé vrstvy v simulaci. Jejich zviditelnění bylo umožněno s použitím chytré komponenty *TubeTrace*, která není standardně v RobotStudio obsažena a je potřeba ji stáhnout z databáze doplňků RobotApps. Ve vlastnostech bylo nutné zvolit nástroj *PrintTool* jako *Mechanism* a jeho TCP jako *Flange*. Pro názornost a jasné odlišení je směs znázorněna oranžovou barvou.

5.1.9 Senzorika

Ačkoliv je v případě navrhovaného pracoviště přítomnost obsluhy u tisku nutná pro kontrolu a doplňování tiskové směsi, je možné čerpadlo rozšířit o zásobník materiálů (silo), které by pracovišti umožnilo plně autonomní chod. Aby obsluha nemusela věnovat veškerou svou pozornost tiskovému procesu, bylo pracoviště doplněno senzory, které řídicímu systému poskytují důležitou zpětnou vazbu a v případě problému tisk zastaví.

Navržená tisková hlava je pasivní prvek pracoviště a nijak s řídicím systémem nekomunikuje. Pro zajištění bezvadného vytlačování je proto hlava doplněna hlídačem průtoku, který reaguje na pohyb materiálu. Pokud hlídač vyhodnotí, že směs neproudí, tisk je zastaven a obsluha je na tuto skutečnost upozorněna skrze varovnou hlášku v uživatelském rozhraní.

Na začátku procesu probíhá tisk testovací linie, který zajišťuje správné naplnění celé přenosové soustavy (čerpadlo, hadice, tisková hlava) směsí a ověřuje, zda je výška

vrstvy správná. Robot tuto linii nanáší před 3 difuzní snímače, jejichž laserové paprsky sledují místa, kam by měla vrstva dosahovat. Pokud test není úspěšný, obsluze je zobrazena varovná hláška, kde může obsluha zvolit opakování testu, nebo ukončení tisku.

```
TestPrinting;                                ! test printing

IF diTestPrint1=0 THEN
  StopMove\Quick;                            ! move stop
  StorePath;                                ! store current path
  UIMsgBox
    \Header:="Tisk zastaven",
    "Neprobiha spravne vytlacovani tiskove smesi!"
    \MsgLine2:="Zkontrolujte testovací linii. Stiskem RETRY bude tisk testovací linie zopakovan."
    \MsgLine3:="Pro úplne zastavení stisknete CANCEL."
    \Buttons:=btnRetryCancel
    \Icon:=iconWarning
    \Result:=answer;                          ! show warning
  RestoPath;                                ! reload path
  StartMove;                                ! move continue
  IF answer = resRetry THEN
    GOTO run;                                ! test printing repeat
  ELSEIF answer = resCancel THEN
    Restart;
  ENDIF
ENDIF
```

Obr. 40 Ukázka kódu – tisk testovací linie

5.1.10 Bezpečnost

Bezpečnostní oplocení je v simulaci reprezentováno chytrou komponentou *scFence*, jejichž 3 vstupy odpovídají 3 bezpečnostním zámčům, kterými budou vybaveny dveře. Pro hlídání bezpečnosti byla přidána TRAP procedura *not_safe*, která v případě otevření kteréhokoliv zámku tisk okamžitě zastaví a není možné pokračovat, pokud dveře nejsou zavřeny.

```
PROC Printing()
  CONNECT security_breach WITH not_safe;
  ISignalDI diLockOpen,1,security_breach;    ! TRAP watching
```

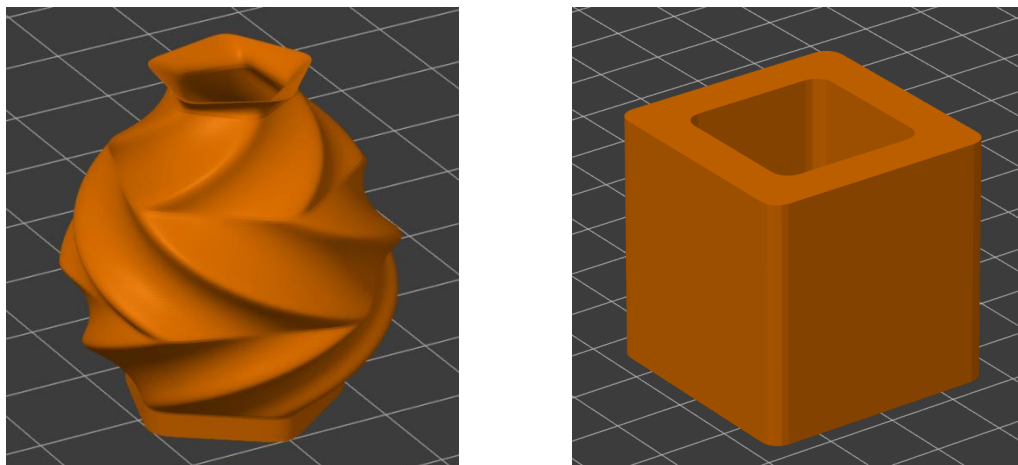
Obr. 41 Ukázka kódu – aktivace TRAP procedury

5.2 Tiskový proces

Následující podkapitola představuje postup práce s pracovištěm, jehož výsledkem bude výsledný vytištěný objekt. Budou představeny jednotlivé kroky od vytvoření modelu až po dokončení tisku a k tomu potřebné nástroje a nastavení.

5.2.1 Tvorba modelu

Největší výhodou 3D tisku je možnost zhmotnění digitálně vymodelovaného objektu. Jeho tvorbou začíná každý tiskový proces. S využitím software Autodesk Inventor byly pro tento případ vymodelovány dva ukázkové objekty – váza a květináč. Při tvorbě modelu je nutné respektovat minimální rozměry vzhledem k tiskovému procesu, který je určen tiskovým průměrem 30 mm a výškou vrstvy 10 mm. Pro další zpracování je nutné ukládat modely vždy do formátu .STL.



Obr. 42 Ukázkové modely vázy a květináče

5.2.2 Slicer

Materiál je nanášen ve vrstvách a je proto potřeba model do těchto vrstev rozdělit. K tomuto účelu slouží nástroje obecně nazývané slicer, které model transformují do pohybových instrukcí, podle kterých robot nanese jednotlivé vrstvy. Ty jsou vyjádřeny ve formátu G-code. Každý řádek vyjadřuje jednotlivé pozice tiskové hlavy v kartézské soustavě souřadnic. Mimo pohybových instrukcí bývají v G-code definované také množství (délka) vytlačeného materiálu, rychlost pohybu, či další nastavení procesu.

G1	X174	Y1784	Z10	F200
Lineární pohyb	Pozice na ose X	Pozice na ose Y	Pozice na ose Z	Rychlost 200 mm/s

Obr. 43 Příklad pohybové instrukce v G-code

V komunitě 3D tisku je oblíbený bezplatný software s otevřeným kódem PrusaSlicer. O vývoj nástroje se stará česká společnost Prusa Research zabývající se také vývojem a výrobou jedné z nejoblíbenějších a světově uznávaných 3D tiskáren pro tisk z plastu Prusa i3. [55] Slicer je povinnou výbavou každého majitele 3D tiskárny a pro široké možnosti úprav, detailní nastavení, velkou komunitu a podrobnou dokumentaci byl pro přípravu tisku v této práci zvolen právě PrusaSlicer ve verzi 2.3.0.

Nástroj obsahuje profily všech variant tiskáren Prusa, ale pro potřeby práce je nutné definovat vlastní nastavení tiskárny i materiálu. Software je lokalizován do mnoha světových jazyků včetně češtiny a díky podrobně popsanému uživatelskému prostředí jej zvládne ovládat i začátečník. Program umožňuje širokou škálu úprav tisku a pracuje ve třech uživatelských profilech – jednoduchém, pokročilém a expertním. Pro přípravu byl zvolen expertní režim, kterým byly zpřístupněny všechny parametry.

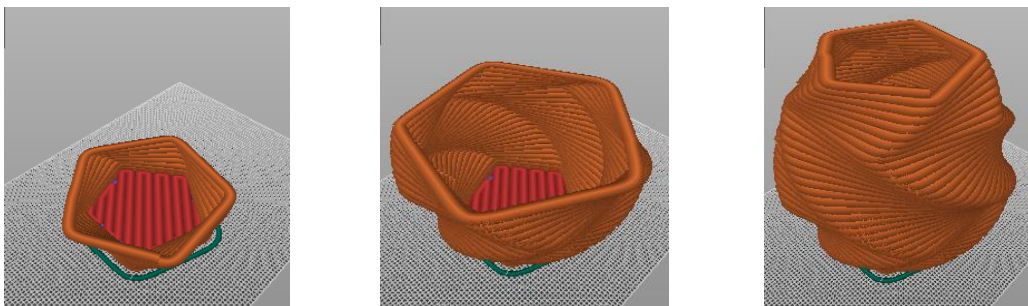
V záložce *Nastavení tisku* v podsekcí *Vrstvy a perimetry* byla upravena obecná výška vrstvy na 10 mm a výška první vrstvy na 80 %, což zajistí správnou přilnavost k podložce. Výška vrstvy rozhoduje o kvalitě a době tisku – čím je vrstva vyšší, tím se snižuje rozlišení tisku, vrstvy jsou viditelnější, ale za to je tisk rychlejší. Pro detailnější

výsledek je potřeba výšku snížit a prodloužit dobu tisku. Podstatné je i nastavení perimetrů – definujících minimální počet obvodových čar tvořících zeď modelu. Toto nastavení tedy přímo ovlivní pevnost modelu. V práci byl záměrně zvolen počet perimetrů 1. Mohlo by se zdát, že tímto nastavením bude zbytečně snížena kvalita výsledného objektu, ale opak je pravdou. Je-li tištěn objekt s jednou obvodovou stěnou, pokaždé se vyskytne malá vada v místě přechodu do další vrstvy. Tím vzniká nevzhledná „jizva“ po celém povrchu objektu. Předějit této vadě lze s režimem *Spirálová váza*. Při něm nevzniká žádné místo změny vrstvy a výška se postupně spojitě zvyšuje, dokud není dosažen nejvyšší bod tisku. Jedním z požadavků pro aktivaci tohoto režimu je nastavení pouze jednoho perimetru. Je potřeba také nastavit hustotu výplně na 0 % v podsekcí *Výplň*. [56]

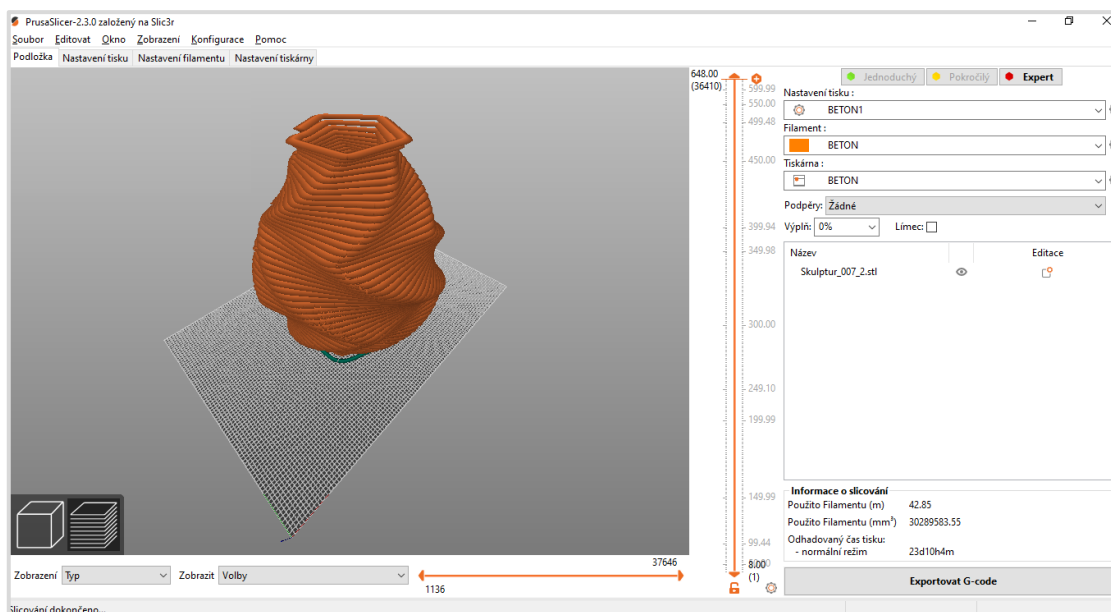
Následující záložka *Nastavení filamentu* se týká tiskového materiálu. V první podsekcí filament byla upraven průměr na 30 mm dle návrhu tiskové hlavy. Zbylé nastavení je možné ignorovat, vztahuje se k nahřívání a chlazení při tisku z plastu, které využito nebude.

Poslední úpravy byly provedeny v záložce *Nastavení tiskárny*, kde byla upravena velikost tiskové podložky na rozměr 1200 x 800 mm, tedy velikost EURO palety. Upravenou konfiguraci je vhodné uložit jako zálohu pro budoucí použití.

Funkcí *Importovat* byly postupně vloženy oba modely, každý samostatně, velkým tlačítkem vpravo dole *Slicovat* byly převedeny do tiskových vrstev a volbou *Exportovat do G-code* vznikly soubory instrukcí, se kterými je možné tisk realizovat.



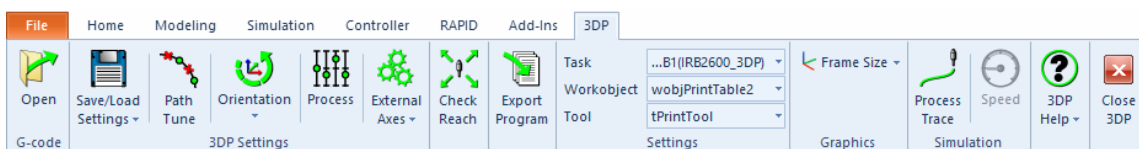
Obr. 44 Vrstvy vázy



Obr. 45 Prostředí PrusaSlicer s modelem vázy

5.2.3 Zpracování v 3D Printing PowerPac

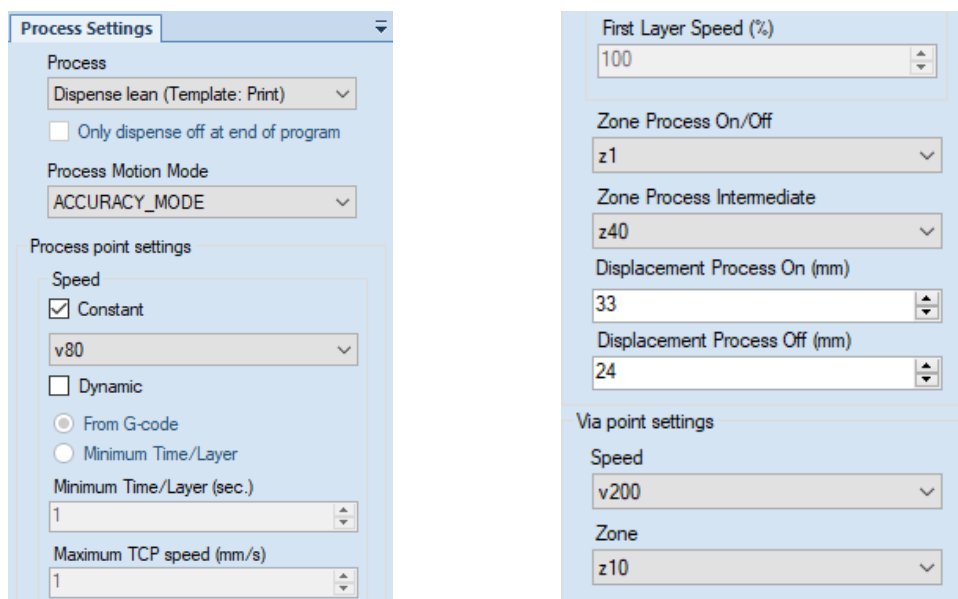
S připravenými G-code soubory již dokáže pracovat 3D Printing PowerPac. Ten se po jeho instalaci nachází v záložce *Add-Ins* pod volbou *3D Printing*. Tlačítkem *Open* vlevo se provádí výběr souboru pro následný import. Potvrzením tlačítkem *Import* je model nahrán do prostředí PowerPacu.



Obr. 46 Nástrojová lišta 3D Printing PowerPac

V nástrojové liště jsou poté k dispozici tyto možnosti:

- *Path Tune* – pro optimalizaci složitých modelů, jejichž tisk lze zrychlit odstraněním přebytečných bodů; v práci nebylo využito.
- *Orientation* – určení, zda bude TCP tiskové hlavy v konstantním natočení, nebo se přizpůsobuje dráze tisku; v práci bylo využito *Constant Orientation*.
- *External Axes* – v komplexnějších pracovištích je možné pro tisk využít externí osu, nástroj je připraven na práci s pojezdem, aktivní tiskovou hlavu s Archimédovým šroubem a tiskovou hlavu natáčející se vždy do směru tisku.
- *Check Reach* – pro ověření, že je tisková hlava schopna dosáhnout všech bodů jednotlivých vrstev a určení ideální konfigurace os robotu.
- *Settings* – volba pracovního workobjectu a tiskového nástroje.
- *Process* – nejdůležitější volba pro nastavení tisku, umožňuje ovlivnit hodnoty pro rychlost (může být konstantní/proměnná) a zón pro jednotlivé stavy; zvolené nastavení, viz. Obr. 47. bylo otestováno jako nejvhodnější.



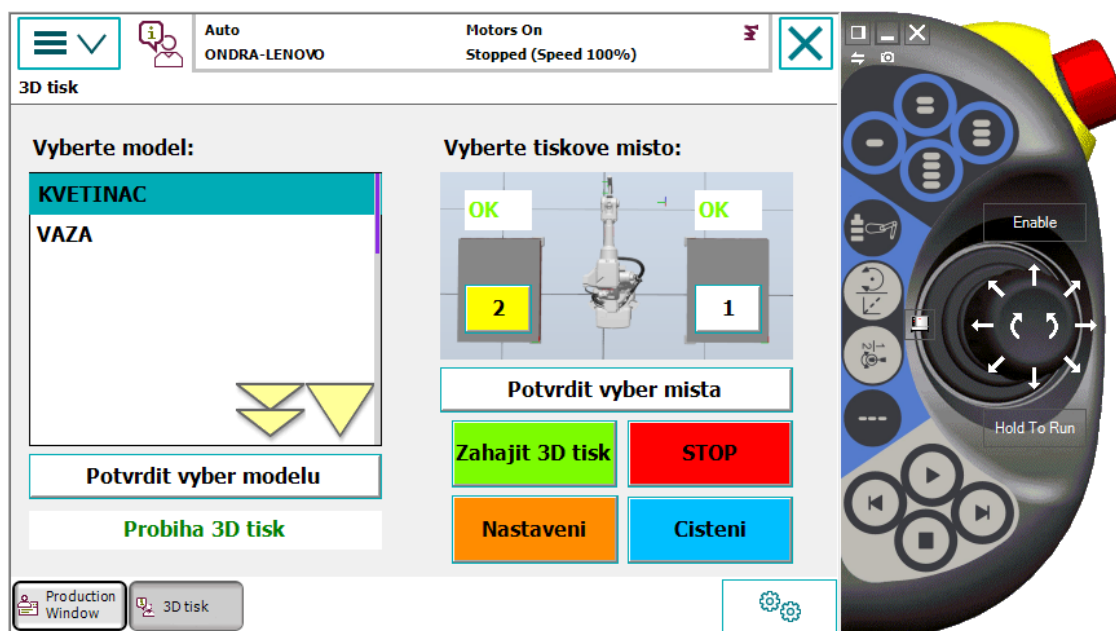
Obr. 47 Nastavení rychlostí a zón

Po nastavení požadovaných hodnot je proces přípravy ukončen volbou *Export Program*, která vygeneruje tiskový program v jazyku RAPID, tedy nativním jazyku ABB pro programování robotů. Tento program je pak dostupný v seznamu *3DP_EXPORT* pro tisk. Pro další použití v navrhovaném pracovišti bylo nutné přímo v programu zakomentovat nastavení workobjectu, aby si obsluha mohla pomocí uživatelského rozhraní vybrat.

5.2.4 Uživatelské rozhraní

Aby bylo ovládání pracoviště pro obsluhu co nejjednodušší, bylo vytvořeno uživatelské rozhraní umožňující snadné nastavení a poskytující informuje o průběhu tisku. Toto rozhraní bylo vytvořeno pro ovládací panel robotu FlexPendant pomocí nástroje ScreenMaker, který je součástí RobotStudia. S tímto intuitivním nástrojem lze velmi snadno sestavit rozhraní z tlačítek a dalších funkčních bloků a následně jim přiřadit chování při interakci s nimi, např. kliknutí na ně.

Připravené rozhraní je dostupné z menu FlexPendantu pod názvem *3D tisk*. Sestává se ze dvou obrazovek, přičemž ta hlavní umožňuje nastavit tisk a na druhé lze provádět optimalizaci tiskové směsi.



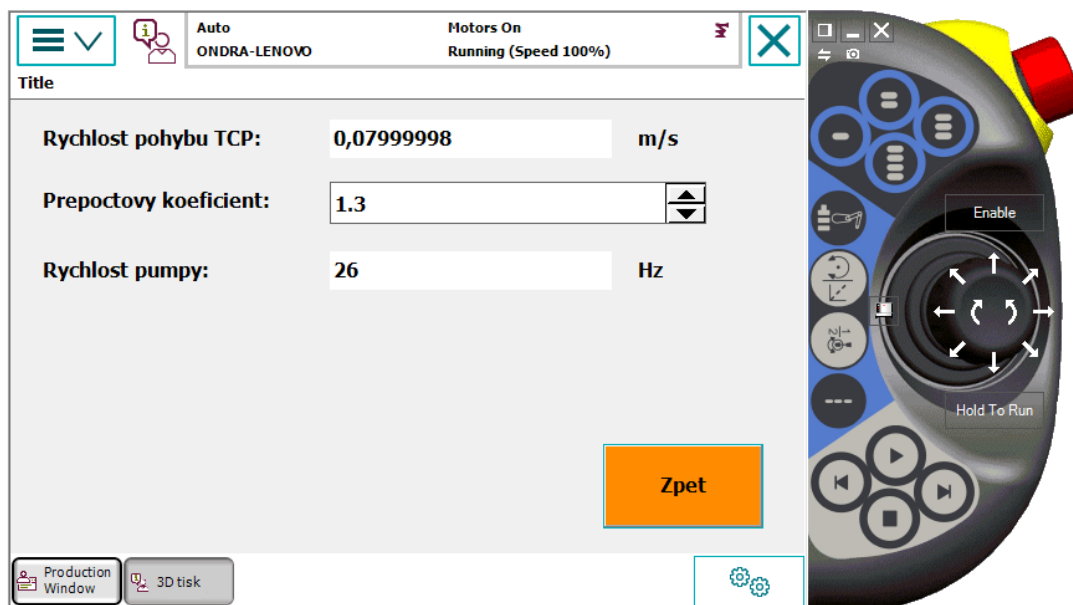
Obr. 48 Hlavní obrazovka uživatelského rozhraní

Hlavní obrazovka je centrem celého pracoviště. Postup práce s ním je velmi jednoduchý a urychluje celý tiskový proces. Uživatel si ze seznamu tiskových programů vybere požadovaný objekt a tlačítkem níže volbu potvrdí. Pokračuje na výběr tiskového místa – díky vizualizaci jasně vidí, které místo vybírá. Přímou nad tiskovým místem je obsluha informována hláškami OK a NOK o přítomnosti palety. Pokud senzor přítomnosti vyhodnotí, že paleta není přítomna, výběr daného tiskového místa není možný. Po potvrzení tiskového místa se celý proces spustí stiskem zeleného tlačítka *Zahajit 3D tisk*. Obsluha je po celou dobu informována o stavu pracoviště prostřednictvím stavového řádku pod výběrem modelu.

Tiskovou operaci lze kdykoliv zastavit červeným tlačítkem *STOP*, které ukončí program a vrátí robot do výchozí pozice.

Modrým tlačítkem *Cistení* robot najede do čistící nádoby, ve které setrvá po celou dobu do dokončení čistícího procesu čerpadla, hadice a tiskové hlavy. Čištění provádí obsluha manuálně dle pokynů výrobce čerpadla.

Oranžové tlačítko *Nastavení* slouží pro přechod na druhou obrazovku, která slouží pro optimalizaci tisku. Obsluha na ní vidí v reálném čase hodnotu rychlosti pohybu TCP v m/s a pomocí nastavitelného pole může ovlivnit rychlost vytlačování nastavením koeficientu k , který je dosazován do vztahu z kapitoly 5.1.7. Dle nastaveného koeficientu je vypočítávána požadovaná frekvence předávaná frekvenčnímu měniči směšovacího čerpadla. Tlačítkem *Zpet* se obsluha může vrátit na hlavní obrazovku.

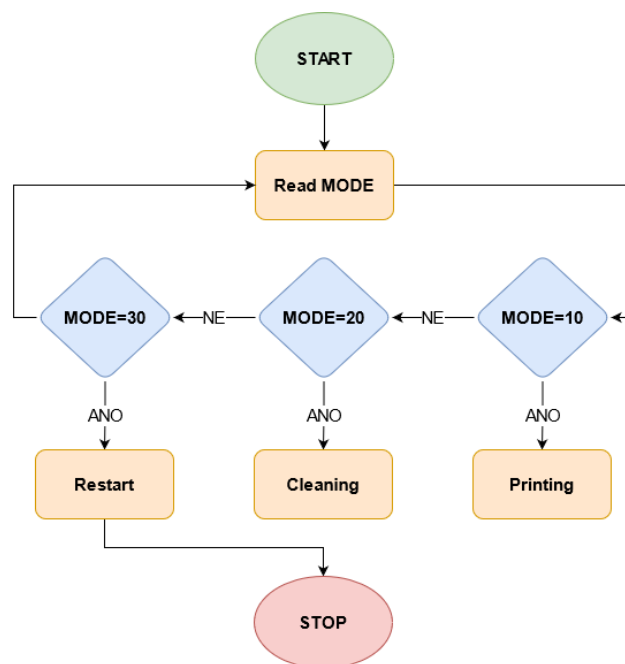


Obr. 49 Druhá obrazovka

5.3 Program pracoviště

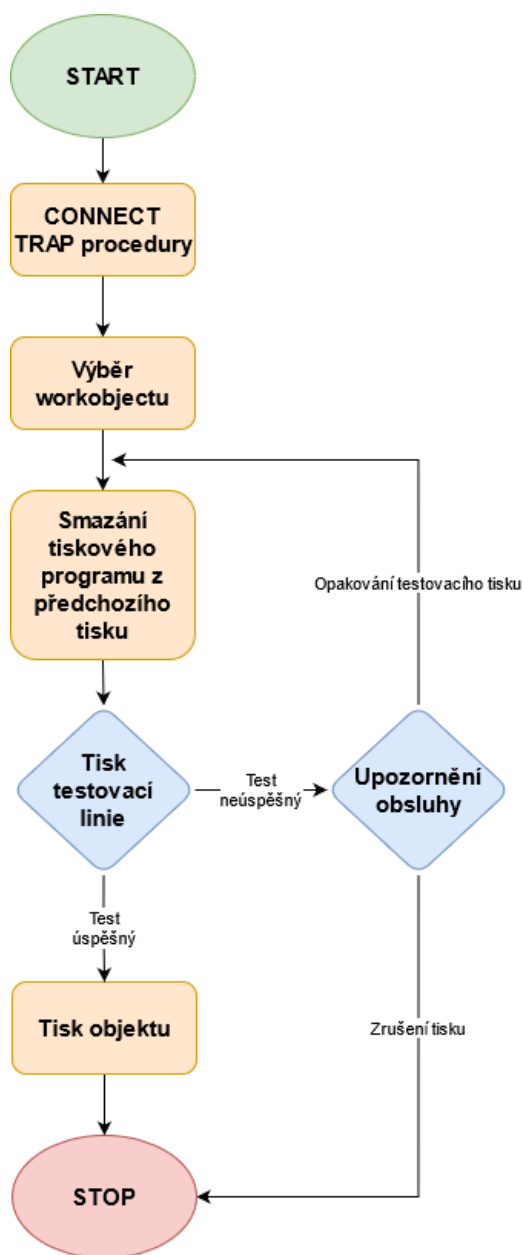
Aby všechny dříve popsané prvky spolupracovaly, je nutné je programově propojit. Nativní jazykem pro řízení pracoviště je v RobotStudio jazyk RAPID. Ve vestavěném editoru byly pomocí příkazů definovány pohyby a závislosti, podle kterých pracoviště funguje.

Hlavní procedura *main* je realizována smyčkou, která neustále čeká na zadání hodnoty *MODE*, která odkáže na požadovanou podproceduru. Jednotlivé možnosti ukazuje vývojový diagram níže. Aby kontrolér neustále čekal na zadání *MODE*, je nutné *Run Mode* kontroléru nastavit na *Continuous*.



Obr. 50 Procedura main

Nejdůležitější podprocedurou je pochopitelně *Printing*, provádějící tisk objektu. Ta je spuštěna po výběru objektu a tiskového místa zeleným tlačítkem *Zahajit 3D tisk* v uživatelském prostředí.



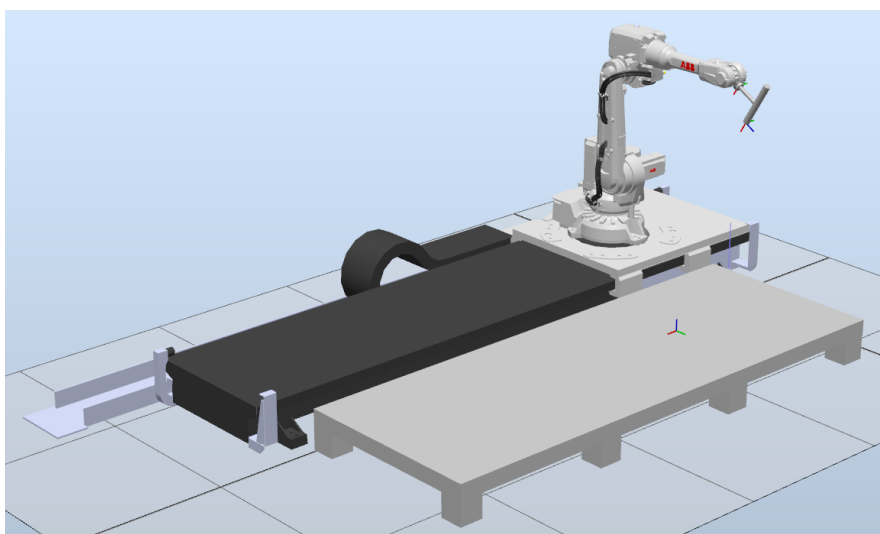
Obr. 51 Podprocedura Printing

Celý tiskový proces a práce s pracovištěm je demonstrován formou videa, které je přílohou této práce. Všechny zmíněné procedury jsou v něm prakticky předvedeny.

6 PRACOVISTĚ S EXTERNÍ OSOU

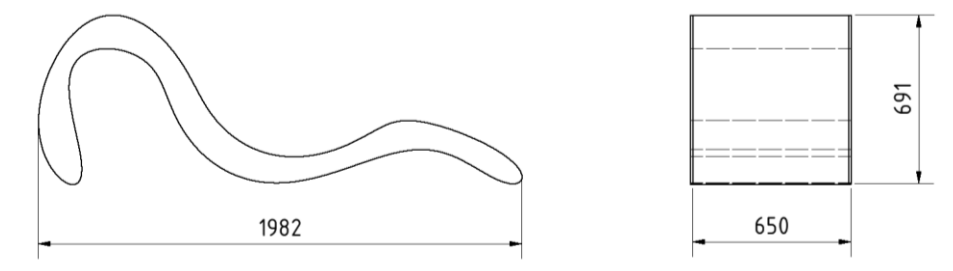
3D Printing PowerPac umožňuje i práci s externí osou. Nad rámec zadání této práce bylo pro ověření této schopnosti vytvořeno druhé pracoviště s robotem na pojezdu. S využitím pojezdu narostla tisková plocha na rozměr 3,2 x 1,2 m, čímž se značně zvětšil potenciál celého pracoviště, které je tak schopné tisku rozměrnějších objektů. Pracoviště se sestává pouze z robotu s tiskovou hlavou, pojezdu a stolu, na který materiál pokládán. V pracovišti byl využit stejný robot jako v kompletním pracovišti, tedy IRB 2600 s dosahem horního ramene 1,85 m a pojezd z portfolio ABB typ IRBT 6004 s délkou 3 m. Nejsou uvažována bezpečnostní opatření a další doplňky (oplocení, tlačítka), které by byly při realizaci nutné.

Příprava pracoviště probíhala podobně jako v kapitole 5.1 – po importu prvků (robot, pojezd, tisková hlava, stůl) bylo potřeba je vzájemně propojit. Pro využití pojezdu byla potřeba instalace *Additional Drive Units* v *Drive Module* v nastavení kontroléru a také instalace balíčku *External Axis Wizard* v sekci Add-Ins. Postup definice tiskové hlavy nebylo potřeba opakovat, neboť byla použita hlava z předchozího pracoviště jako knihovna se všemi nastaveními. Stůl reprezentuje zjednodušený model, pro který byl vytvořen workobject. Aby bylo možné vidět výsledek tisku, byla i zde importována chytrá komponenta *TubeTrace*.



Obr. 52 Výsledný model pracoviště s robotem na pojezdu

Pro ověření funkčnosti bylo potřeba vytvořit model tiskového objektu, v tomto případě vzniklo dekorativní lehátko pomocí křivkového modelování. Vlastní návrh je inspirován lehátky běžně dostupnými na trhu.

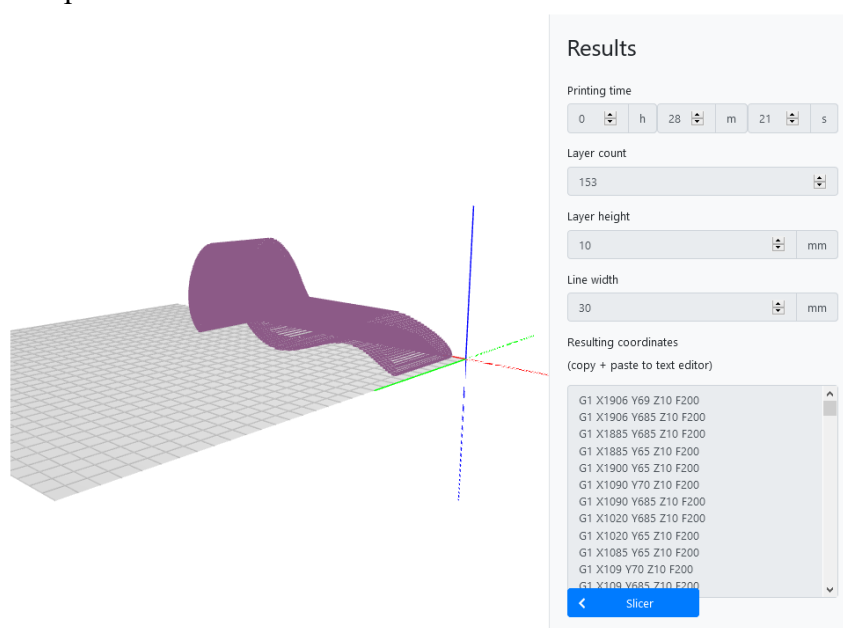


Obr. 53 Rozměry lehátka



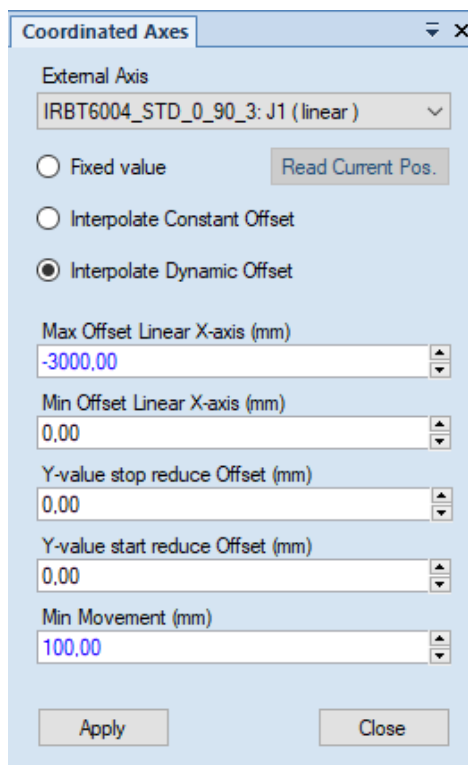
Obr. 54 3D model lehátka

PrusaSlicer má velikost tiskové plochy omezenou na 1,2 x 1,2 m. Z toho důvodu nebylo možné provést přípravu G-code v něm a byl vyhledán alternativní nástroj. Jako vhodný se ukázal SlicerXL, aplikace běžící v internetovém prohlížeči bez nutnosti instalace. Oproti PrusaSliceru je funkcemi velmi omezená, ale základní převod modelu do vrstev je schopna provést. Proces je rozdělen do 4 kroků – nastavení tiskové plochy, import modelu, volitelné transformace, a nakonec převod do pohybových instrukcí v G-code pro další zpracování.



Obr. 55 G-code instrukce modelu lehátka v nástroji SlicerXL

Další zpracování modelu vychází z postupu uvedeného v kapitole 5.2.3, zde byla navíc využita funkce *External Axis* a volba *Coordinated Axis* pro využití pojezdu při tisku. Zde je klíčová volba *Interpolate Dynamic Offset*, která umožní pohyb v celé délce pojezdu. V poli *Max Offset Linear X-axis* byla zadána délka pojezdu (v záporné hodnotě kvůli zvolenému souřadnému systému) a také hodnota minimálního posuvu pro dosažení kvalitního tisku v poli *Min. Movement*.



Obr. 56 Nastavení externí osy

Práce s 3D Printing PowerPac končí exportem programu. V tomto případě nebyl využit export do RAPID programu, ale body modelu byly jako jednotlivé robtargety definovány přímo v simulaci. Tento přístup umožňuje snadnou úpravu tiskových vrstev, kdy je možné přidat, upravit nebo odstranit jednotlivé instrukce.

Pracoviště s robotem na pojezdu se takto podařilo zprovoznit a jeho fungování je předvedeno na videu, které je přílohou této práce.

7 ZHODNOCENÍ

V předcházejících kapitolách byly provedeny všechny potřebné kroky pro digitální zprovoznění robotického pracoviště pro 3D tisk z betonu. Na základě vypracované rešerše, která se zaměřila na v praxi osvědčené technologie a postupy byl proveden návrh pracoviště a jeho prvků. Následně byla vytvořena kompletní simulace včetně uživatelského rozhraní a byl představen podrobný postup, jak s pracovištěm pracovat. Výstupem práce je řídicí program připravený pro reálné nasazení. Nad rámec zadání práce bylo vytvořeno ještě druhé pracoviště využívající externí osu.

Navržené řešení splňuje cíle práce, je však potřeba ho považovat za základ, na kterém mohou stavět navazující práce. Schopnosti pracoviště jsou omezeny pouze na tisk malých objektů a pro využití např. v architektuře by bylo potřeba upravit koncept pracoviště.

Využitelnost pracoviště by stoupla po rozšíření o možnost pokračování v tisku i po restartu kontroléru. Tím by bylo možné provádět časově náročné tisky velkých modelů s přestávkami. Vhodné by bylo redukovat obsluhu na nutné minimum systémem pro automatickou dopravu vytištěných objektů z prostoru pracoviště. Odpadla by tím potřeba využití vysoko zdvižného vozíku pro manipulaci s paletami. Pozornost by si také zasloužila bezpečnostní opatření, kdy by se vypracováním analýzy rizik mohlo předejít nepopsaným nebezpečným stavům dalšími bezpečnostními prvky. V práci byl kladen důraz na softwarová opatření, která přímo ovlivňují simulaci (tlačítka pro nouzové zastavení, bezpečnostní zámky).

Jeden z nejpodstatnějších faktorů ovlivňující celou simulaci je složení tiskové směsi. V práci se předpokládá „ideální“ směs, která splňuje všechny požadavky představené v kapitole 3.4. Dosáhnout takových vlastností ve skutečnosti si však žádá experimentální přístup a množství testů. Autor práce nemá zkušenosti s technologií 3D tisku z betonu a vychází jen z vypracované rešerše. Pokud by se navržené pracoviště projevilo jako nedostačující, nabízí se vyzkoušet variantu s aktivní tiskovou hlavou či jinou technologií míchání a čerpání směsi. Vliv na kvalitu tisku může značně ovlivnit také tvarovaná tryska, se kterou se v současném návrhu nepočítá. V simulaci se nepracuje se ani se systémem pro dopravu směsi do tiskové hlavy. Pokud by byla použita hadice, bylo by potřeba doplnit systém pro její uchycení a polohování.

Druhé pracoviště s externí osou bylo v této práci zpracováno pouze na základní úrovni, kdy bylo záměrem pouze otestovat schopnosti balíčku 3D Printing PowerPac, ne však připravit pracoviště pro reálný provoz. Důkazem toho je jednoduchý stůl, kdy nebylo hlouběji ověřeno, zda by jeho konstrukce byla vhodná pro objekty s vyšší hmotností. Nebyl uvažován ani způsob manipulace s finálním objektem.

Na vyšší úroveň by pracoviště posunulo přidání dalšího robotu, který by automatizoval začistišťování vytištěného objektu. S výměnným systémem hlavic kartáčů a brusných kotoučů by bylo možné po vytvrzení objekt očistit bez manuální práce obsluhy. Toto rozšíření by výrazně zvýšilo výslednou kvalitu objektu.

8 ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byl navržen a digitálně zprovozněn robotizovaný výrobní systém pro 3D tisk z betonu. Práce byla rozdělena do kapitol, které reflektují celý proces tvorby systému, od vytvoření přehledu současného stavu poznání, přes systémový rozbor řešené problematiky až po sestavení a vytvoření programu pracoviště.

V přehledu současného stavu poznání byl shrnut princip a historický vývoj 3D tisku, popsán obecný tiskový proces a 3 nejvyužívanější metody 3D tisku obecně. Na tyto poznatky navazuje rozbor 3D tisku z betonu – důvody, proč má smysl se jím zabývat a snažit se o jeho rozvoj doplňuje charakteristika 3 nejvyužívanějších technologií. Přehled uzavírá přiblížení témat automatizace, digitálního modelování a s ním spojeným digitálním zprovozněním, nechybí popis způsobů a nástrojů pro jeho realizaci.

V navazujícím systémovém rozboru řešené problematiky byly zformulovány cíle práce a byl vypracován systém podstatných veličin, který napomohl uvědomit si všechny podstatné aspekty systému. V navazujících podkapitolách byly postupně představeny požadavky na tiskový materiál, čerpadlo, tiskovou hlavu a pohybový systém pro dosažení úspěšného tisku.

Se znalostí požadavků byl v následující kapitole vypracován návrh pracoviště. Pracoviště bylo navrženo pro experimentální užití. Vzhledem k tomu, že není plánováno jeho zapojení do většího výrobního procesu a nejsou na něj kladeny požadavky v délce časového cyklu, nebyl proveden návrh více variant a vyhodnocení nejvhodnější z nich. Dále byly vybrány jednotlivé prvky a popsán způsob jejich využití a komunikace.

Vytvořené pracoviště bylo v další kapitole digitálně zprovozněno v ABB RobotStudio. Detailně byl popsán postup od vytvoření modelu dle návrhu, přes nastavení jednotlivých prvků až po vytvoření simulace a řídicího program systému. Nechybí popis práce s pracovištěm, které zahrnuje vytvoření a zpracování modelu pro tisk a následnou přípravu tiskového programu. Pro obsluhu vzniklo přehledné uživatelské rozhraní usnadňující práci s pracovištěm. Nad rámec této práce vznikl návrh druhého pracoviště, využívající externí osu, pro ověření možností tisku větších objektů.

Simulace byla zpracována tak, aby odpovídala reálnému chodu pracoviště včetně signálové komunikace a řídicí program je tak možné ihned využít v reálném provozu. Přestože se může stát, že bude nutné při realizaci optimalizovat tiskový proces, díky digitálnímu zprovoznění bude uvedení do provozu rychlejší a jednodušší. Z výše uvedeného lze konstatovat, že digitální zprovoznění digitální zprovoznění robotizovaného výrobního systému pro 3D tisk bylo úspěšné a cíle této diplomové práce byly splněny.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] What is 3D printing? [online]. [vid. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [2] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D HUBS, 2017. ISBN 978-90-827485-0-5.
- [3] Ariadne. *New Scientist* [online]. 1974, (64). ISSN 0262-4079. Dostupné z: <https://books.google.co.uk/books?id=nvabM3KXNsUC&pg=PA80#v=onepage&q&f=false>
- [4] 3DSOURCED. The Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2020. *3DSourced* [online]. 26. srpen 2020 [vid. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://3dsourced.com/guides/history-of-3d-printing/>
- [5] Discover the history of 3D printer. *3D Printing Blog: Tutorials, News, Trends and Resources / Sculpteo* [online]. [vid. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>
- [6] LIPSON, Hod a Melba KURMAN. *Fabricated: the new world of 3D printing*. Indianapolis, Indiana: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 978-1-118-35063-8.
- [7] SAVINI, A a G. G SAVINI. A short history of 3D printing, a technological revolution just started. In: *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON)*. B.m.: IEEE, 2015, s. 1–8. ISBN 978-1-5090-0065-4.
- [8] WOHLERS, Terry. Additive manufacturing and composites: An update. *CompositesWorld*. 2017, 3(6), 6. ISSN 23765232.
- [9] LIM, S., R.A. BUSWELL, T.T. LE, S.A. AUSTIN, A.G.F. GIBB a T. THORPE. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction* [online]. 2012, 21, 262–268. ISSN 09265805. Dostupné z: [doi:10.1016/j.autcon.2011.06.010](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010)
- [10] PERROT, Arnaud a Sofiane AMZIANE. 3D Printing in Concrete: General Considerations and Technologies. In: . 2019, s. 1–40. ISBN 978-1-78630-341-7.
- [11] BUSWELL, R.A., R.C. SOAR, A.G.F. GIBB a A. THORPE. Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Automation in Construction* [online]. 2007, 16(2), 224–231. ISSN 09265805. Dostupné z: [doi:10.1016/j.autcon.2006.05.002](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002)
- [12] Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies [online]. [vid. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>
- [13] F42 COMMITTEE. *Terminology for Additive Manufacturing - General Principles - Terminology* [online]. B.m.: ASTM International. nedatováno [vid. 2020-12-01]. Dostupné z: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?ISOASTM52900-15>

- [14] HAGER, Izabela, Anna GOLONKA a Roman PUTANOWICZ. 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *Ecology and new building materials and products* 2016. 2016, **151**, 292–299. ISSN 1877-7058.
- [15] 3D Concrete Printing Market to Reach \$ 56.4 Million by 2021. *3Printr.com* [online]. 2. červen 2016 [vid. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://www.3printr.com/3d-concrete-printing-market-reach-56-4-million-2021-1239664/>
- [16] KOVÁŘÍK, Michal, Pavel SVOBODA a Petr ŠTEMBERK. *Technologie 3D tisku v architektuře a stavebnictví* [online]. 3. srpen 2018 [vid. 2020-12-05]. Dostupné z: <http://www.earch.cz/cs/stavitelstvi/technologie-3d-tisku-v-architekture-stavebnictvi>
- [17] KHOSHNEVIS, Behrokh. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *The best of ISARC 2002* [online]. 2004, **13**(1), 5–19. ISSN 0926-5805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2003.08.012
- [18] *2015 Global Highest 3D Printing Building* [online]. [vid. 2020-12-12]. Dostupné z: http://www.winsun3d.com/En/Product/pro_inner_5/id/102
- [19] *2016 3D Printing Dubai Government Office* [online]. [vid. 2020-12-12]. Dostupné z: http://www.winsun3d.com/En/Product/pro_inner_5/id/107
- [20] *Stavebnictví budoucnosti - unikátní projekt 3D tisku* [online]. [vid. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.pci-cz.cz/cz/stavebnictvi-budoucnosti-unikatni-projekt-3d-tisku.html>
- [21] *scoolpt - Prvok. schoolpt* [online]. [vid. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.scoolpt.com/prvok/>
- [22] DINI, Enrico, Roberto NANNINI a Moreno CHIARUGI. Method and device for building automatically conglomerate structures [online]. CA2602071A1. 28. září 2006. [vid. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/CA2602071A1/en?q=enrico+dini>
- [23] VATIN, Nikolai, Liudmila CHUMADOVA, Ivan GONCHAROV, Vera ZYKOVA, Alexander KARPENYA, Anton KIM a Evgeniy FINASHENKOV. 3D-печать в строительстве [online]. 2017 [vid. 2020-12-13]. Dostupné z: doi:10.18720/CUBS.52.3
- [24] BOS, Freek, Rob WOLFS, Zeeshan AHMED a Theo SALET. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2016, **11**(3), 209–225. ISSN 1745-2759, 1745-2767. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2016.1209867
- [25] Monolitický beton a bednění – zajištění bezpečnosti práce. *ASB Portal* [online]. 9. srpen 2010 [vid. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hruba-stavba/cement-a-beton/monoliticky-beton-abedneni-zajisteni-bezpecnosti-prace>
- [26] MAREK, David, Petr NĚMEC a FRANČE, VÁCLAV. *Studie Automatizace práce v ČR* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cz/Documents/strategy-operations/Automatizace-prace-v-CR.pdf>

- [27] FREY, Carl Benedikt a Michael A. OSBORNE. The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Technological Forecasting and Social Change* [online]. 2017, **114**, 254–280. ISSN 0040-1625. Dostupné z: doi:10.1016/j.techfore.2016.08.019
- [28] KAGERMANN, Henning, Wolf-Dieter LUKAS a Wolfgang WAHLSTER. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. *VDI nachrichten*. 2011, **13**(1).
- [29] KAGERMANN, Henning, Johannes HELBIG, Ariane HELLINGER a Wolfgang WAHLSTER. *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group*. B.m.: Forschungsunion, 2013.
- [30] *The Future is...Industry 4.0 | Materialise - Innovators you can count on* [online]. [vid. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/blog/future-industry-40>
- [31] LASI, Heiner, Peter FETTKE, Hans-Georg KEMPER, Thomas FELD a Michael HOFFMANN. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering* [online]. 2014, **6**(4), 239–242. ISSN 1867-0202. Dostupné z: doi:10.1007/s12599-014-0334-4
- [32] WÜNSCH, Georg. *Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme*. B.m., 2008. Utz.
- [33] KIEFER, Jens, Martin BERGERT a Mario ROSSDEUTSCHER. Mechatronic objects in production engineering. *atp magazin*. 2010, **52**(12), 36–44.
- [34] LECHLER, Tobias, Eva FISCHER, Maximilian METZNER, Andreas MAYR a Jörg FRANKE. Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems. *Procedia CIRP* [online]. 2019, **81**, 1125–1130. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2019.03.278
- [35] ABB. *RobotStudio Produktový list* [online]. [vid. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A4796&LanguageCode=cs&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [36] JANÍČEK, Přemysl. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky : hledání souvislostí. Učební texty I*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM : VUTUM, 2007.
- [37] GOSSELIN, C., R. DUBALLET, Ph. ROUX, N. GAUDILLIÈRE, J. DIRRENBARGER a Ph. MOREL. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials & Design* [online]. 2016, **100**, 102–109. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.03.097
- [38] MALAEB, Zeina, Fatima ALSAKKA a Farook HAMZEH. 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. In: *3D Concrete Printing Technology* [online]. B.m.: Elsevier, 2019 [vid. 2020-12-05], s. 115–136. ISBN 978-0-12-815481-6. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00006-3
- [39] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: Brno : VUTUM, 2000.
- [40] *Vodní součinitel | eBeton - Specialista na beton* [online]. [vid. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/vodni-soucinitel>

- [41] LE, T. T., S. A. AUSTIN, S. LIM, R. A. BUSWELL, A. G. F. GIBB a T. THORPE. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures* [online]. 2012, **45**(8), 1221–1232. ISSN 1871-6873. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-012-9828-z
- [42] *m-tec Směšovací čerpadla - omítací stroje* [online]. [vid. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://www.m-tec.cz/vyrobky/technika-na-stavenisti/stroje/smesovaci-cerpadla/>
- [43] *MAI®MULTIMIX-3D* [online]. [vid. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://www.mai.at>
- [44] M-TEC. *Návod k obsluze m-tec duo-mix 2000*
- [45] LEAL DA SILVA, Wilson Ricardo. 3D Concrete Printing - from material design to extrusion. In: . B.m. 2017.
- [46] PCM. *Progressing cavity pumps* [online]. [vid. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://www.pcm.eu/en/industry/pcm-solutions/progressive-cavity-pumps>
- [47] JARETT GROSS. *12 Steps to Operate a Concrete 3D Printer* [online]. 2020 [vid. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=2BGoXcDRy2s>
- [48] BAUMIT. Baumit BauMinator® Systemkomponenten. *baumit.at* [online]. [vid. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://baumit.at/bauminator/bauminator-systemkomponenten>
- [49] CONCRE3DLAB GHENT. *Experimenting with Nozzles* [online]. 2019 [vid. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=v5bl4UPaAU4>
- [50] JI, Guangchao, Tao DING, Jianzhuang XIAO, Shupeng DU, Jun LI a Zhenhua DUAN. A 3D Printed Ready-Mixed Concrete Power Distribution Substation: Materials and Construction Technology. *Materials* [online]. 2019, **12**(9), 1540. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12091540
- [51] Technology | vertico | concrete printing. *vertico* [online]. [vid. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://www.vertico.xyz>
- [52] ABB. *Produktový leták robotu ABB IRB 2600* [online]. [vid. 2021-05-01]. Dostupné z: https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0142EN_B&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch
- [53] COMAC CAL. *Hlídač proudění FS 10 Montážní a obslužný návod* [online]. [vid. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://www.comacal.cz/navody/>
- [54] KOTEK, Martin, Bc. a Michal VOCILKA Bc. Nejpoužívanější typy senzorů v průmyslové automatické výrobě. In: *Podpora spolupráce škol a firem* [online]. B.m. 2015 [vid. 2021-05-02]. Dostupné z: <http://www.nuv.cz/pospolu/nejpouzivanejsi-typy-senzoru-v-prumyslove-automaticke-vyrobe>
- [55] Original Prusa i3 MK3S+. *Prusa Research a.s. – 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši* [online]. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/original-prusa-i3-mk3/>
- [56] Vrstvy a perimetry. *Prusa Knowledgebase* [online]. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/vrstvy-a-perimetry_1748/

10 SEZNAM ZKRATEK, OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH

10.1 Seznam zkratk

3D	tri-dimensional
UV	ultraviolet
SLA	stereolithography apparatus
USA	United States of America
CAD	Computer Aided Design
STL	Standart Tessellation Language
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
DLP	Digital Light Processing
SLS	Selective Laser Sintering
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
HIL	hardware-in-the-loop
SIL	software-in-the-loop
RIL	reality-in-the-loop
UHPC	Ultra High Performance Concrete
TCP	Tool Center Point

10.2 Seznam obrázků

Obr. 1 Srovnání výrobních procesů	17
Obr. 2 Grafické srovnání finanční výhodnosti výrobních procesů vzhledem k produkci	18
Obr. 3 Schéma výrobního procesu 3D tisku	19
Obr. 4 Klasifikace technologií dle ISO/ASTM 52900	20
Obr. 5 Schéma FDM tiskárny	21
Obr. 6 Schéma SLA tiskárny	21
Obr. 7 Schéma SLS tiskárny	22
Obr. 8 Schéma tisku metodou Contour Crafting	24
Obr. 9 a) Nejvyšší budova vytvořená 3D tiskem na světě, b) kancelářský objekt v Dubai	24
Obr. 10 a) Dům Prvok vytvořený 3D tiskem (vlevo), b) detail struktury zdi domu Prvok (vpravo).....	25

Obr. 11 a) Příklad objektu vytištěného metodou D-Shape (vlevo), b) příklad objektu vytištěného metodou Concrete Printing (vpravo)	26
Obr. 12 Betonové sloupy vytvářené tradiční metodou pomocí bednění	26
Obr. 13 Míra úspory nákladu pomocí robotické automatizace	27
Obr. 14 Klíčové prvky Průmyslu 4.0	28
Obr. 15 Náklady na opravu chyb v závislosti na době objevení chyb	30
Obr. 16 Porovnání přípravy výrobního systému s a bez digitálního zprovoznění	30
Obr. 17 Způsoby digitálního zprovoznění.....	31
Obr. 18 Virtuální plánování výroby s ABB RobotStudio	32
Obr. 19 Schematické vyjádření systému podstatných veličin.....	33
Obr. 20 Schéma robotického pracoviště pro 3D tisk	35
Obr. 21 Zkroucené vrstvy po tisku s nevhodně nastavenou směsí.....	37
Obr. 22 a) m-tec duo-mix 2000 (vlevo), b) MAI MULTIMIX-3D (vpravo).....	37
Obr. 23 a) Peristaltické čerpadlo (vlevo), b) pístové čerpadlo (vpravo)	38
Obr. 24 Princip fungování excentrického šroubového čerpadla	38
Obr. 25 Pasivní tisková hlava.....	39
Obr. 26 a) Aktivní tisková hlava systému Bauminator (vlevo), b) tisková hlava s Archimédovým šroubem (vpravo).....	40
Obr. 27 Příklady tvarovaných trysek.....	40
Obr. 28 a) Pracoviště využívající portálovou konstrukci (vlevo), b) pracoviště s robotem na pojezdu (vpravo).....	41
Obr. 29 Schéma celého tiskového procesu se šestiosým robotem	41
Obr. 30 Schéma pracoviště.....	43
Obr. 31 Pracovní dosah robotu ABB IRB 2600-12/1.85	44
Obr. 32 a) Hlídač průtoku FS 10, b) způsob instalace hlídače průtoku	45
Obr. 33 Pasivní tisková hlava, vlastní návrh.....	45
Obr. 34 Princip fungování difúzního optického senzoru	46
Obr. 35 Schéma komunikace pracoviště	47
Obr. 36 Přidání instrukce PrintL	49
Obr. 37 Výsledný model pracoviště.....	50
Obr. 38 Souřadnicové systémy tiskové hlavy	51
Obr. 39 Schéma komunikace optimalizace tisku	53
Obr. 40 Ukázka kódu – tisk testovací linie	54
Obr. 41 Ukázka kódu – aktivace TRAP procedury.....	54
Obr. 42 Ukázkové modely vázy a květináče.....	55
Obr. 43 Příklad pohybové instrukce v G-code	55
Obr. 44 Vrstvy vázy	56
Obr. 45 Prostředí PrusaSlicer s modelem vázy	57
Obr. 46 Nástrojová lišta 3D Printing PowerPac.....	57
Obr. 47 Nastavení rychlostí a zón	58
Obr. 48 Hlavní obrazovka uživatelského rozhraní.....	59
Obr. 49 Druhá obrazovka	60

Obr. 50 Procedura main	60
Obr. 51 Podprocedura Printing	61
Obr. 52 Výsledný model pracoviště s robotem na pojezdu	63
Obr. 53 Rozměry lehátka	64
Obr. 54 3D model lehátka	64
Obr. 55 G-code instrukce modelu lehátka v nástroji SlicerXL	64
Obr. 56 Nastavení externí osy	65

10.3 Seznam tabulek

Tabulka 1 Signály čerpadla	52
----------------------------------	----

10.4 Seznam příloh

Obsah ZIP archivu s přílohami, který je připojen k elektronické verzi závěrečné práce:

ZIP

- └ 2021_DP_Beranek_Ondrej_182809_video.mp4 – video demonstrující funkčnost digitálně zprovozněného výrobního systému pro 3D tisk